



**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE PER
L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO**
X Ciclo - Nuova Serie (2008-2011)
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

**LA SIMULAZIONE NUMERICA COME
STRUMENTO DI ANALISI DEL MOTO
ONDOSO SULLE BARRIERE SOFFOLTE**

**THE NUMERICAL SIMULATION AS A TOOL TO ANALYSE
THE WAVE MOTION OVER SUBMERGED BREAKWATER**

ING. SALVATORE DAVIDE RUSSO

Relatore:

PROF. ING. EUGENIO PUGLIESE
CARRATELLI

Coordinatore:

PROF. ING. LEONARDO CASCINI

Correlatore:

ING. FABIO DENTALE

In copertina: Esempi di output grafico di simulazioni numeriche

LA SIMULAZIONE NUMERICA COME STRUMENTO DI ANALISI DEL
MOTO ONDOSI SULLE BARRIERE SOFFOLTE

Copyright © 2011 Università degli Studi di Salerno – via Ponte don Melillo, 1 – 84084
Fisciano (SA), Italy – web: www.unisa.it

Proprietà letteraria, tutti i diritti riservati. La struttura ed il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magnetico-ottico, ottico, cartaceo, etc.).

Benché l'autore abbia curato con la massima attenzione la preparazione del presente volume, Egli declina ogni responsabilità per possibili errori ed omissioni, nonché per eventuali danni dall'uso delle informazioni ivi contenute.

Finito di stampare il 20/02/2012

*Ai miei Genitori,
a mio Fratello Mario Giovanni,
a mia Sorella Maria Domenica,
alla mia Famiglia.*

INDICE GENERALE

| | |
|--|------|
| Indice generale..... | i |
| Indice delle figure..... | iii |
| Indice delle tabelle..... | ix |
| Sommario..... | xi |
| Abstract..... | xiii |
| Ringraziamenti..... | xv |
| About the author..... | xvi |
| 1 Introduzione..... | 1 |
| 1.1 Contenuto e scopo dello studio..... | 1 |
| 1.2 Organizzazione della tesi..... | 3 |
| 2 Cenni di Modellazione numerica..... | 5 |
| 2.1 Metodi Numerici..... | 5 |
| 2.2 Turbolenza..... | 7 |
| 2.3 Equazioni RANS..... | 11 |
| 2.4 Modelli di turbolenza..... | 13 |
| 2.4.1 Il modello $k-\varepsilon$ | 13 |
| 2.4.2 Il modello RNG..... | 14 |
| 2.4.3 Funzione di parete..... | 15 |
| 2.5 Spostamento della superficie libera..... | 17 |
| 2.5.1 Metodo VOF (Volume Of Fluid)..... | 18 |
| 2.6 Condizioni al contorno..... | 21 |
| 2.7 Implementazione numerica..... | 23 |
| 2.7.1 Sistemi basati su griglia..... | 23 |
| 2.7.2 Condizione di stabilità..... | 24 |
| 2.8 Metodologie numeriche per la modellazione RANS/VOF..... | 25 |
| 2.8.1 Descrizione generale dei modelli RANS/VOF..... | 25 |
| 2.8.2 Procedura di simulazione..... | 27 |
| 2.8.3 Generazione del moto ondoso..... | 27 |
| 2.8.4 Generazione del moto ondoso usando la teoria descrittiva delle onde lineari..... | 29 |
| 3 Studio numerico sulle sperimentazioni di Vidal et al. (2001)..... | 33 |
| 3.1 Descrizione del set-up sperimentale e numerico..... | 33 |
| 3.2 Descrizione della modellazione numerica..... | 38 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.3 | Calibrazione | 40 |
| 3.4 | Spettri | 45 |
| 3.5 | Analisi della Riflessione | 51 |
| 3.5.1 | Confronto con formule di letteratura (riflessione) | 56 |
| 3.6 | Analisi della Trasmissione | 65 |
| 3.6.1 | Confronto con formule di letteratura (trasmissione) | 68 |
| 3.7 | Analisi del Setup..... | 79 |
| 4 | Modellazione fisica di un ripascimento protetto: prove in laboratorio del caso studio della spiaggia di Calabaia di Belvedere Marittimo (CS)..... | 89 |
| 4.1 | Introduzione alla modellazione fisica del tratto di litorale soggetto a ripascimento protetto..... | 90 |
| 4.2 | Descrizione del prototipo oggetto di studio..... | 92 |
| 4.3 | Descrizione del setup sperimentale e del modello..... | 97 |
| 4.3.1 | Vasca di sperimentazione e strumentazione di misura | 97 |
| 4.3.2 | Strumenti di misura | 99 |
| 4.3.3 | Realizzazione del modello fisico | 103 |
| 4.4 | Modellazione Fisica | 104 |
| 4.4.1 | Esperimenti condotti | 104 |
| 4.4.2 | Risultati modellazione fisica..... | 104 |
| 4.4.3 | Riflessione e trasmissione del moto ondoso | 107 |
| 5 | Modellazione numerica del caso studio della spiaggia di Calabaia di Belvedere Marittimo (CS)..... | 109 |
| 5.1 | Caratteristiche barriera e dominio di calcolo | 109 |
| 5.2 | Analisi di Sensibilità della Griglia | 111 |
| 5.3 | Analisi dei Risultati | 114 |
| 5.3.1 | Sensibilità della riflessione al variare di ΔL | 114 |
| 5.3.2 | Spettri | 123 |
| 5.3.3 | Riflessione | 128 |
| 5.3.4 | Trasmissione | 136 |
| 6 | Conclusioni | 145 |
| | Bibliografia | 149 |
| | Allegato A..... | 155 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Cascata dell'energia (Kolmogorov, 1941) | 9 |
| Figura 2.2 Approcci per il calcolo del flusso turbolento | 10 |
| Figura 2.3 Scomposizione di un segnale statisticamente stazionario | 11 |
| Figura 2.4 Scomposizione di un segnale non statisticamente stazionario | 11 |
| Figura 2.5 Elevazione della superficie libera in funzione del tempo | 17 |
| Figura 2.6 Esempio di valori di F con algoritmo VOF..... | 18 |
| Figura 2.7 Valori tipici della funzione VOF vicino a superficie libera | 19 |
| Figura 2.8 Approssimazione della superficie libera e definizione delle normali con VOF | 20 |
| Figura 2.9 Sistemazione griglia e convenzioni etichettatura..... | 24 |
| Figura 2.10 Ubicazione delle variabili in una generica cella della griglia di calcolo | 26 |
| Figura 2.11 Ondogeno con sistema "Piston Paddle Motion" | 28 |
| Figura 2.12 Ondogeno con sistema "Flap Motion" | 28 |
| Figura 2.13 Interfaccia per la generazione del moto ondosso in FLOW-3D | 29 |
| Figura 2.14 Onda lineare proveniente da un serbatoio a fondo entrante nel dominio computazionale (FLOW-3D user manual)..... | 30 |
| Figura 3.1 Set up sperimentale usato da Vidal et al., 2001 | 34 |
| Figura 3.2 Punti di misurazione usati da Vidal et al. (2001): a) oscillazione pelo libero, b) pressioni, c) velocità. | 35 |
| Figura 3.3 Schema della mesh di calcolo usata in Garcia et al. (2004) con sistema di ricircolo..... | 37 |
| Figura 3.4 Discretizzazione del dominio di calcolo..... | 38 |
| Figura 3.5 Particolare della griglia di calcolo utilizzata in FLOW-3D..... | 39 |
| Figura 3.6 Andamento delle Eta registrati a diversi gauge per le tre mesh utilizzate (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm) | 42 |
| Figura 3.7 Calibrazione Eta ai diversi gauge (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm)..... | 43 |
| Figura 3.8 Andamento del Set-Up (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm) | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.9 Evoluzione dello spettro di potenza nell'area protetta in assenza (sinistra) ed in presenza (destra) di una struttura sommersa (Ciardulli 2009) | 46 |
| Figura 3.10 Ampiezza delle armoniche, gauges 1-12, h=40cm, T=1.6s, H=7cm (Garcia et al. 2004) | 47 |
| Figura 3.11 Ampiezza delle armoniche, gauges 1-12, h=40cm, T=1.6s, H=7cm (FLOW-3D) (nero freq. fondamentale, verde 2°armonica, viola 3°armonica)..... | 49 |
| Figura 3.12 Andamento della velocità orizzontali per la simulazione di calibrazione..... | 50 |
| Figura 3.13 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione..... | 51 |
| Figura 3.14 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di H_{inc} (in blu B=25cm, in rosso B=100cm), sonde al largo (riflessione della barriera)..... | 54 |
| Figura 3.15 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di B/H_{inc} (in blu B=25cm, in rosso B=100cm), sonde al largo (riflessione della barriera)..... | 54 |
| Figura 3.16 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di T (in blu B=25cm, in rosso B=100cm), sonde al largo (riflessione della barriera) | 55 |
| Figura 3.17 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di H_{inc} (in blu B=25cm, in rosso B=100cm), sonde lato spiaggia | 55 |
| Figura 3.18 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di T (in blu B=25cm, in rosso B=100cm), sonde lato spiaggia..... | 56 |
| Figura 3.19 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm) | 62 |
| Figura 3.20 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm) | 62 |
| Figura 3.21 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta (1989) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)..... | 63 |
| Figura 3.22 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Zanuttigh et al. (2004) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)..... | 63 |
| Figura 3.23 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Van der Meer (2005) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)..... | 64 |
| Figura 3.24 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_r (B=25cm e B=100cm)..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.25 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di T (blu_B=25cm, rosso_B=100cm) | 67 |
| Figura 3.26 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di B/L (blu_B=25cm, rosso_B=100cm) | 67 |
| Figura 3.27 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di B/ H_{inc} (blu_B=25cm, rosso_B=100cm) | 68 |
| Figura 3.28 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Van Der Meer (1990) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm) | 73 |
| Figura 3.29 Confronto K_t simulati con database di dati usati da Van Der Meer (1990) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)..... | 73 |
| Figura 3.30 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di d'Angremond (1996) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm) | 74 |
| Figura 3.31 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Seabrooke e Hall (1998) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)..... | 74 |
| Figura 3.32 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Briganti (2003) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)..... | 75 |
| Figura 3.33 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=25cm, B=100cm)..... | 76 |
| Figura 3.34 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=25cm) | 77 |
| Figura 3.35 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=100cm)..... | 78 |
| Figura 3.36 Risultati calibrazione setup, test case da Vidal et al., 2001 (H=7cm, T=1.6s), in arancione i risultati della calibrazione in FLOW-3D | 79 |
| Figura 3.37 Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera a cresta bassa (Ruol et al., 2003)..... | 80 |
| Figura 3.38 Setup con e senza ricircolo attivato, test case da Vidal et al., 2001 (H=7cm, T=1.6s) | 81 |
| Figura 3.39 Confronto valori setup da formula di Loveless con quelli simulati (B=100cm)..... | 82 |
| Figura 3.40 Confronto valori setup da formula di Loveless (pieni) con quelli simulati (vuoti) (B=100cm) | 82 |
| Figura 3.41 Confronto valori setup da formula di Loveless con quelli simulati (B=25cm)..... | 83 |
| Figura 3.42 Confronto valori setup da formula di Loveless (pieni) con quelli simulati (vuoti) (B=25cm) | 83 |
| Figura 3.43 (Calabrese et al., 2008) | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.44 Confronto valori setup calcolati con il metodo da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati (rosso_B=25cm, blu_B=100cm) | 86 |
| Figura 3.45 Confronto valori setup da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati al variare di H_{inc} (blu_B=100cm)..... | 87 |
| Figura 3.46 Confronto valori setup da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati al variare di H_{inc} (rosso_B=25cm)..... | 87 |
| Figura 3.47 Andamento con le ascisse del setup simulato e valori da relazione di Loveless e Calabrese (B=100cm)..... | 88 |
| Figura 3.48 Andamento con le ascisse del setup simulato e valori da relazione di Loveless e Calabrese (B=25cm)..... | 88 |
| Figura 4.1 Sezione tipo del ripascimento protetto realizzato in località Calabaia nel Comune di Belvedere Marittimo (CS)..... | 92 |
| Figura 4.2 Immagine dell'area oggetto di studio in cui è stata evidenziata la sezione n°29 utilizzata come riferimento per la realizzazione del modello numerico. | 94 |
| Figura 4.3 Sovrapposizione dei profili rilevati dal 2005 al 2008 in corrispondenza della sezione n° 29 nell'area di esecuzione dell'intervento di ripascimento protetto oggetto di studio | 95 |
| Figura 4.4 Schema 3D della vasca di sperimentazione | 97 |
| Figura 4.5 Vasca con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania..... | 97 |
| Figura 4.6 Particolare dell'ondogeno in dotazione alla vasca..... | 98 |
| Figura 4.7 Planimetria e sezione longitudinale della vasca | 98 |
| Figura 4.8 Sonde resistive..... | 100 |
| Figura 4.9 Profilatore di velocità ADV | 100 |
| Figura 4.10 Schema del posizionamento in vasca delle sonde resistive e del micro ADV | 101 |
| Figura 4.11 Picchetti graduati sulla spiaggia | 102 |
| Figura 4.12 Videocamera stereoscopica (Videre Design)..... | 102 |
| Figura 4.13 Immagine del laser adottato ed esempio di foto utilizzata per la calibrazione..... | 102 |
| Figura 4.14 Schema sonde per esperimenti con onda regolare | 105 |
| Figura 4.15 Variazione nel tempo delle altezze d'onda significativa in regime di onda morfologica regolare (0 min<t<660 min, ovvero 2 anni a scala di prototipo)..... | 106 |
| Figura 4.16 Coefficienti di riflessione al variare del periodo medio, ottenuti sul modello fisico della configurazione originale in condizioni di onda regolare (DICA, Uni. Catania)..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.17 Coefficienti di trasmissione al variare del periodo medio, ottenuti sul modello fisico della configurazione originale in condizioni di onda morfologica regolare (DICA, Uni. Catania) | 107 |
| Figura 5.1 Schema del canale numerico | 109 |
| Figura 5.2 Profilo riprodotto per le simulazioni numeriche | 110 |
| Figura 5.3 Particolare delle mesh di calcolo (A_mesh1, B_mesh2, C_mesh3)..... | 112 |
| Figura 5.4 Andamento delle Eta nel tempo all'ascissa X=1m per le 3 mesh di calcolo usate. | 113 |
| Figura 5.5 Scostamenti delle Eta tra le 3 mesh di calcolo | 113 |
| Figura 5.6 Posizione sonde per analisi sensibilità per la riflessione | 115 |
| Figura 5.7 Analisi di sensibilità K_r al variare del rapporto Δ/L (OR15_F_bar)..... | 116 |
| Figura 5.8 Analisi di sensibilità K_r al variare del rapporto Δ/L (OR15_D_bar)..... | 117 |
| Figura 5.9 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione..... | 119 |
| Figura 5.10 Confronto Eta, posizione x=1.00m..... | 120 |
| Figura 5.11 Confronto Eta, posizione x=9.275m | 121 |
| Figura 5.12 Confronto Eta, posizione x=12.70m | 121 |
| Figura 5.13 Andamento delle Eta (OR15_B_bar)..... | 124 |
| Figura 5.14 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_B_bar) | 124 |
| Figura 5.15 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_B_bar) | 124 |
| Figura 5.16 Andamento delle Eta (OR15_F_bar)..... | 125 |
| Figura 5.17 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_F_bar)..... | 125 |
| Figura 5.18 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_F_bar)..... | 125 |
| Figura 5.19 Andamento delle Eta (OR15_I_bar)..... | 126 |
| Figura 5.20 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_I_bar)..... | 126 |
| Figura 5.21 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_I_bar)..... | 126 |
| Figura 5.22 Andamento delle Eta (OR15_O_bar)..... | 127 |
| Figura 5.23 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_O_bar)..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.24 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_O_bar)..... | 127 |
| Figura 5.25 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione..... | 128 |
| Figura 5.26 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di H_{si} | 130 |
| Figura 5.27 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di T | 130 |
| Figura 5.28 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988) | 133 |
| Figura 5.29 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta (1989) | 134 |
| Figura 5.30 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Zanuttigh et al. (2004) | 134 |
| Figura 5.31 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Van der Meer (2005)..... | 135 |
| Figura 5.32 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_r | 135 |
| Figura 5.33 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di T | 137 |
| Figura 5.34 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di B/L..... | 137 |
| Figura 5.35 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di H_{si} | 138 |
| Figura 5.36 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Van Der Meer (1990)..... | 140 |
| Figura 5.37 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di d'Angremond (1996)..... | 140 |
| Figura 5.38 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Briganti (2003) | 141 |
| Figura 5.39 Confronto K_t simulati con valori sperimentali alla base della formula di Van Der Meer (1990) | 142 |
| Figura 5.40 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t | 143 |
| Figura 5.41 Confronto con i risultati sperimentali riportati in Losada et al., 1997 | 144 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|----|
| Tabella 3.1 Caratteristiche del materiale utilizzato in laboratorio per la barriera Vidal et al., 2001) | 34 |
| Tabella 3.2 Caratteristiche del moto ondoso e delle profondità nelle prove di laboratorio (Vidal et al., 2001) | 36 |
| Tabella 3.3 Valori dei coefficienti Alfa e Beta per la caratterizzazione del mezzo poroso..... | 36 |
| Tabella 3.4 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia (B=25cm) | 52 |
| Tabella 3.5 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia (B=100cm) | 53 |
| Tabella 3.6 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura (B=25cm) | 59 |
| Tabella 3.7 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura (B=100cm) | 60 |
| Tabella 3.8 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_r (B=25cm e B=100cm)..... | 61 |
| Tabella 3.9 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_t simulati (B=25cm) | 65 |
| Tabella 3.10 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_t simulati (B=100cm) | 66 |
| Tabella 3.11 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_t simulati e calcolati con formule di letteratura (B=25cm) | 71 |
| Tabella 3.12 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_t simulati e calcolati con formule di letteratura (B=25cm) | 72 |
| Tabella 3.13 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=25cm e B=100cm)..... | 76 |
| Tabella 3.14 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=25cm) | 77 |
| Tabella 3.15 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=100cm) | 78 |
| Tabella 4.1 Caratteristiche granulometriche di progetto della barriera soffolta e dello strato di filtro del caso in studio | 93 |

| | |
|--|-----|
| Tabella 4.2 Caratteristiche granulometriche di progetto del ripascimento del caso in studio | 93 |
| Tabella 4.3 Volumi e diametri dei materiali utilizzati | 103 |
| Tabella 4.4 Caratteristiche idrodinamiche delle onde regolari (Configurazione originale)..... | 105 |
| Tabella 5.1 Geometria delle mesh di calcolo..... | 112 |
| Tabella 5.2 Risultati analisi sensibilità riflessione (OR15_F_bar)..... | 116 |
| Tabella 5.3 Risultati analisi sensibilità riflessione (OR15_D_bar)..... | 117 |
| Tabella 5.4 Parametri delle simulazioni realizzate con onde regolari (presenza barriera)..... | 119 |
| Tabella 5.5 Caratteristiche moto ondoso simulato alle diverse ascisse (caso barriera)..... | 122 |
| Tabella 5.6 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia..... | 129 |
| Tabella 5.7 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura | 132 |
| Tabella 5.8 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_r | 133 |
| Tabella 5.9 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati | 136 |
| Tabella 5.10 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura | 139 |
| Tabella 5.11 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_r | 143 |

SOMMARIO

Nell'ambito dell'ingegneria idraulica, in particolare nel campo della fluidodinamica numerica, la tecnica di maggiore impiego, per la risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes e loro derivate, è quella euleriana. Tale approccio (equazioni RANS) è risultato infatti molto efficace, soprattutto accoppiato con la tecnica VOF (Volume of Fluid) per il tracciamento della superficie libera, per la rappresentazione dei problemi di meccanica dei fluidi caratterizzati da correnti non-stazionarie aperte all'atmosfera.

Una particolare classe di questi problemi, di interesse nell'ambito dell'idraulica marittima, è rappresentata dalla interazione tra moto ondoso e strutture di difesa delle coste. Un fenomeno di questo tipo risulta fortemente influenzato da svariati parametri quali, ad esempio, le caratteristiche del moto ondoso incidente, la profondità dell'acqua, la topografia del fondo, la tipologia (geometria e porosità) del corpo investito dalla corrente.

Allo stato attuale, l'analisi dell'interazione moto ondoso strutture di protezione (barriere in massi naturali o artificiali) è stata condotta prevalentemente su base sperimentale; solo da pochi anni, con lo sviluppo di processori per calcolatori più sofisticati, si riesce a studiare il fenomeno dal punto di vista numerico.

La bibliografia sulle tematiche esposte è molto vasta; vanno tuttavia ricordate alcune pubblicazioni in cui sono raccolti interessanti esempi di come tali problematiche sono state affrontate sia dal punto di vista fisico che numerico: Karim, et al., 2009; Lara et al., 2008; Lara et al., 2006; Ting et al., 2004; Hur et al., 2003; Huang et al., 2003; Hsu et al., 2002; Losada et al., 1995; van Gent, 1995, Garcia et al., 2003, Vidal et al 2001, Dentale et al. (2008, 2009, 2010), Monaco, 2010.

Nello studio alla base del lavoro di tesi sono state approfondite le tematiche prima esposte mediante simulazioni numeriche (RANS+VOF) al fine di realizzare un'analisi dettagliata del fenomeno di interazione moto ondoso-barriera, con particolare attenzione alla modellazione dei fenomeni riguardanti strutture porose (riflessione, trasmissione e generazione setup a tergo delle strutture).

Durante l'attività di ricerca sono state anche seguite sperimentazioni su modello fisico presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli studi di Catania.

ABSTRACT

As a part of hydraulic engineering, in particular in the field of numerical fluid dynamics, for the resolution of the Navier-Stokes equations and their derivatives, the Eulerian technique is the most used. This approach (RANS equations) was in fact very effective, especially coupled with the VOF technique (Volume of Fluid) for tracking the free surface, for the representation of fluid mechanics problems characterized by non-stationary current open to the atmosphere.

A particular class of these problems, of interest in maritime hydraulics, is represented by the interaction between waves and coastal defense structures. A phenomenon of this type is greatly influenced by various parameters such as, for example, the characteristics of the incident wave, the water depth, the bottom topography, the type (geometry and porosity) of the body invested by the current.

At present, the analysis of the interaction between waves and protection structures (natural or artificial rocks made breakwaters) was conducted mainly on an experimental basis, and only since a few years ago, with the development of computers, it is possible to study the phenomenon from the numerical point of view.

The bibliography on this issues is extensive and some publications should be remembered, in which interesting examples of how these issues were addressed by both the physical and numerical point of view are collected: Karim, et al. 2009; Hsu et al., 2008, Lara et al., 2008, Lara et al., 2006, Ting et al. 2004; Hur et al., 2003, Huang et al., 2003, Hsu et al. 2002; Losada et al., 1995, van Gent, 1995, Garcia et al., 2003, Vidal et al 2001, Dentale et al. (2008, 2009, 2010), Monaco, 2010.

In the research study of this thesis the previous exposed issues were first addressed by numerical simulations (RANS+VOF) in order to achieve a detailed analysis of the phenomenon of wave-breakwater interaction, with particular attention to the modeling of phenomena for porous structures (reflection, transmission and generation of setup in the lee side of structures).

During the research activities also experiments on physical model were carried out at the Department of Civil and Environmental Engineering, University of Catania.

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Pugliese Carratelli per i preziosi insegnamenti durante gli anni di dottorato e per le ore dedicate alla revisione della mia tesi. Inoltre, ringrazio l'Ing. Dentale che mi ha seguito fin dall'inizio dell'attività di ricerca ed è stato sempre disponibile a dirimere i miei dubbi. Intendo poi ringraziare tutte le persone che, durante questi anni, sono state capaci di rallegrare le giornate passate insieme al LIDAM. Ringrazio anche il Prof. Foti e l'Ing. Musumeci del DICA dell'Università di Catania per la disponibilità nel farmi seguire parte della loro attività sperimentale; a tal proposito un grazie sentito va anche a Salvo (Ing. Pistorio). Sempre per l'attività svolta a Catania ringrazio il Prof. Veltri dell'Università della Calabria.

Un grazie immenso va alla mia Famiglia tutta (genitori, fratelli, nonni, zii e cugini), che mi ha sostenuto e “sopportato” fin dal primo giorno in cui ho messo piede alla facoltà di Ingegneria.

Chiedo scusa a mio fratello Mario se magari sono sembrato a lui assente in questi anni, non era mia intenzione.

Ringrazio tutti gli amici e i compagni di studio che hanno condiviso con me sia i momenti belli che le cadute fin dall'inizio il mio percorso universitario.

Infine ringrazio Marika che, assecondando con pazienza i miei sbalzi di umore, le mie ansie e paure, ha saputo incoraggiarmi sempre, facendomi ritrovare la capacità di vedere tutto in una prospettiva migliore. Devo ringraziarla per questo, per la felicità che mi trasmette, per la nostra storia, per tutto.

ABOUT THE AUTHOR

Salvatore Davide Russo è nato a Napoli nel 1983. Ha conseguito la laurea di primo livello in Ingegneria Civile per l'Ambiente e il Territorio nel 2005 con una tesi in Costruzioni Idrauliche, nel 2008 la laurea specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio con una tesi in Idraulica Marittima, entrambe presso l'Università degli Studi di Salerno. Nel Novembre 2008 ha iniziato il corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile per l'Ambiente e il Territorio, presso l'Università degli Studi di Salerno, portando avanti un argomento di ricerca riguardante l'applicazione dei moderni metodi di Fluidodinamica Computazionale allo studio dell'interazione del moto ondoso con le strutture di difesa delle coste.

Salvatore Davide Russo was born in Naples in 1983. He studied at the University of Salerno (Italy) receiving his bachelor's degree in Civil Engineering for the Environment and Land Use in 2005 with a thesis in Hydraulic Engineering; in 2008 he got his master's degree in Environmental and Land Use Engineering with a thesis in Maritime Hydraulics. In November 2008 he joined the PhD course in Civil Engineering for the Environment and Land Use, at the University of Salerno, carrying on a research topic concerning the application of modern Computational Fluid Dynamics methods to the study of the wave interaction with coastal defence structures.

1 INTRODUZIONE

1.1 CONTENUTO E SCOPO DELLO STUDIO

Nel presente lavoro di tesi si è voluto verificare l'applicabilità dei modelli di fluidodinamica computazionale (CFD), basati sulle equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds (RANS) accoppiate a modelli di turbolenza, allo studio dell'interazione moto ondoso – strutture costiere. Uno dei vantaggi di utilizzare modelli numerici basati sulle equazioni RANS rispetto a modelli più semplici è il fatto di non dover specificare criteri di rottura per le onde in quanto la rottura è conseguenza diretta della dinamica descritta dalle equazioni generali implementate. L'interpretazione della dinamica del fluido viene fatta direttamente dalle grandezze simulate (velocità, pressioni, turbolenza) oppure dall'evoluzione temporale della superficie libera, così come nei test di laboratorio.

I modelli di CFD risolvono le equazioni fondamentali della dinamica dei fluidi, insieme a delle metodologie per il tracciamento della superficie libera, mediante l'introduzione di un modello di chiusura per la turbolenza, ciò rende necessario tenere conto dell'effetto della discretizzazione del dominio di calcolo sulla soluzione finale che si ottiene.

Lin e Liu (1998) e Bradford (2000) hanno riprodotto con buona approssimazione gli esperimenti di Ting e Kirby (1995, 1996), utilizzando un approccio bidimensionale di CFD simile a quello utilizzato per lo studio qui descritto. Ting e Kirby studiarono la rottura di tipo spilling e plunging in un canale sperimentale di 40m di lunghezza, 60cm di larghezza ed 1m di profondità, con un profilo di spiaggia lineare di pendenza 1:35.

Lin e Liu (1998) hanno confrontato puntualmente per un singolo evento di rottura i risultati del loro modello di CFD ottenendo buoni riscontri.

Bradford (2000) oltre a verifiche puntuali del suo modello numerico ha anche guardato i risultati mediati ritrovando ugualmente un buon accordo con quelli sperimentali.

Garcia et al. (2004) hanno condotto importanti esperimenti numerici sulla base di sperimentazioni fisiche eseguite nell'ambito del progetto DELOS (Vidal et al. 2001) sulle barriere sommerse grazie alle quali hanno dimostrato come la CFD (con il codice di calcolo COBRAS), applicata ai problemi di idraulica marittima, possa fornire valide indicazioni sulla risposta di un sistema complesso come quello onda-struttura.

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di verificare ulteriormente che i modelli CFD possono essere utilizzati per simulare la trasformazione e la rottura delle onde alla scala di laboratorio, creando così una sorta di "laboratorio numerico" che può essere utilizzato per migliorare la comprensione dei processi che si mettono in atto nell'interazione moto ondoso strutture di protezione litoranee, in particolare nel caso quelle sommerse, fornendo un valido supporto alla progettazione e gestione degli interventi di protezione dei litorali.

In particolare si è deciso di utilizzare un software commerciale (FLOW-3D prodotto dalla Flow Science, USA) basato sull'integrazione su griglia fissa delle equazioni RANS accoppiate a modelli di chiusura della turbolenza, con un algoritmo VOF per il tracciamento della superficie libera (Hirt e Nichols, 1981).

Le capacità di tale software sono state testate ed ampiamente usate per gli scopi prima descritti dall'unità di ricerca del MEDUS (Maritime Engineering Division - University of Salerno) i cui risultati sono riportati in diversi lavori (Dentale et al. 2008, 2009, 2010; Monaco 2010).

I risultati ottenuti dall'applicazione del codice numerico sono stati testati con esperimenti di laboratorio, condotti nell'ambito dell'attività di ricerca, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) dell'Università di Catania insieme all'unità di ricerca del prof. E. Foti, e con altri risultati sperimentali e numerici presenti in letteratura, nonché con formule di letteratura (di tipo sperimentale) utilizzate nella pratica per determinare alcuni parametri riconducibili ai fenomeni di interazione onda-struttura (coefficiente di riflessione e di trasmissione, set-up).

1.2 ORGANIZZAZIONE DELLA TESI

La tesi è organizzata come segue: nel capitolo 2 sono brevemente descritti i metodi numerici usati in CFD, unitamente alla metodologia RANS/VOF come implementata nel software FLOW-3D.

Il capitolo 3 riporta l'applicazione dello schema di modellazione numerica e di confronto applicato ad un caso di sperimentazioni fisiche effettuate nell'ambito del progetto DELOS (Vidal et al. 2001) che è stato anche riprodotto numericamente con un modello numerico (COBRAS) simile a quello utilizzato nel presente lavoro (Garcia et al. 2004, Lara et al. 2006).

Il capitolo 4 riporta in sintesi l'esperienza di modellazione fisica condotta presso il DICA dell'Università di Catania per il caso di una barriera soffolta a protezione di un ripascimento sita presso Calabaia del comune di Belvedere Marittimo (CS).

Nel capitolo 5 è descritta l'analisi numerica condotta sulla base della sperimentazione fisica descritta al capitolo 4, con i confronti tra i risultati ottenuti nei due casi, sulla base dello schema usato per lo studio del capitolo 3.

Il capitolo 6 riporta la discussione delle conclusioni.

2 CENNI DI MODELLAZIONE NUMERICA

2.1 METODI NUMERICI

Le equazioni per il moto dei fluidi (le equazioni di Navier-Stokes) furono derivate per la prima volta nel 1822 da Navier (e da Stokes autonomamente di nuovo nel 1845).

Queste equazioni, sostanzialmente, esprimono la conservazione della massa e della quantità di moto per unità di massa del fluido:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}$$

Con z asse verticale, per cui la forza di massa dovuta all'attrazione gravitazionale appare solo nella equazione proiettata lungo l'asse z .

La risoluzione di queste equazioni, che descrivono completamente ogni fenomeno fluidodinamico, viene fatta per via discreta generalmente con un metodo che può essere:

- agli elementi finiti,
- alle differenze finite,
- ai volumi finiti.

Il metodo degli elementi finiti è più comunemente usato in combinazione con le griglie non strutturate, ovvero quelle in cui il dominio di calcolo è suddiviso in celle di piccole dimensioni che possono avere forma diversa, ognuna delle quali è un elemento che viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee. Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma

elementare, la soluzione del problema è assunta essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di base o funzioni di forma (shape functions).

La mancanza di una struttura rende necessario, anche per calcoli semplici, più tempo di calcolo rispetto ad una griglia strutturata con lo stesso numero di celle. Però la griglia non strutturata è estremamente flessibile ed adattabile a geometrie complesse.

Il metodo delle differenze finite discretizza un'equazione differenziale in un'equazione alle differenze rendendolo particolarmente adatto per le griglie strutturate.

Il metodo dei volumi finiti, che è il metodo utilizzato in questa tesi, consiste nel suddividere l'intero dominio in tanti volumi elementari, e scrivere quindi le relazioni che intercorrono tra i vari volumetti confinanti impiegando la forma integrale delle equazioni di Navier-Stokes. L'approssimazione risiede nel fatto che tali volumetti hanno dimensione finita e non infinitesima.

Le equazioni di Navier-Stokes e di continuità sono leggi di conservazione fisica, che forniscono il bilancio della quantità di moto (e di massa) valido per ogni volume.

Se le leggi di conservazione si applicano ad un volume arbitrariamente piccolo intorno ad un punto nel dominio, le equazioni discretizzate forniscono una soluzione sufficientemente approssimata di quella reale.

Quando si applica questo metodo, il dominio di calcolo deve essere discretizzato in celle, come per il metodo degli elementi finiti, mediante una griglia che può essere o meno strutturata. Senza entrare nei dettagli, discretizzare ai volumi finiti significa che per ogni cella, localmente, la legge di conservazione si applica, per tutte le variabili così come per la quantità di moto, l'energia termica, l'energia cinetica turbolenta, ecc. Per ogni passo temporale, il flusso sul confine delle celle è calcolato con il contributo di convezione, diffusione e differenze di pressione. Quando il flusso netto è positivo, la quantità di moto nella cella aumenta e quindi aumenta la velocità. Il confine di una cella è sempre parte del confine tra due celle adiacenti, così che quando il flusso calcolato attraverso il confine è uguale per le due celle, vuol dire che la quantità di moto è numericamente conservata.

2.2 TURBOLENZA

La principale difficoltà nello studio della turbolenza è la presenza simultanea nel liquido di un gran numero di strutture vorticosi con differente dimensione caratteristica che interagiscono reciprocamente tra loro.

Queste sono causa di effetti non lineari (e quindi di termini non lineari nelle equazioni di Navier-Stokes) che ne rendono difficile la risoluzione analitica.

Nel 1941, Kolmogorov ha formulato la sua teoria della turbolenza, sulla base di un approccio statistico, che ha descritto mediante lo spettro di energia.

L'idea di base di questa teoria è che la turbolenza consiste nel trasferimento di energia cinetica turbolenta da strutture vorticosi più grandi verso quelle più piccole, dove viene poi dissipata in calore.

Le dimensioni definiscono una scala di lunghezza caratteristica per i vortici, che sono caratterizzati anche da scale di velocità e tempi che dipendono da quella della lunghezza. I vortici di grandi dimensioni sono instabili e possono rompersi generando i piccoli vortici, e l'energia cinetica del vortice iniziale di grandi dimensioni è divisa tra quelli piccoli che ne derivano. Questi vortici più piccoli subiscono lo stesso processo, dando luogo a loro volta a vortici più piccoli che ereditano l'energia del loro predecessore, e così via.

In questo modo, l'energia viene trasmessa dalle grandi scale del moto alle scale più piccole fino a raggiungere una lunghezza sufficientemente piccola in modo tale che la viscosità del fluido può dissipare efficacemente l'energia cinetica in energia interna.

Questo processo è detto “cascata dell'energia”.

Per numeri di Reynolds molto alti, i movimenti alla piccola scala della turbolenza sono statisticamente isotropi (cioè non si riconosce una direzione spaziale preferenziale). In generale, i moti alla grande scala del flusso non sono isotropi, poiché sono determinati dalla particolare geometria caratteristiche del problema in esame (la dimensione caratteristica alla grande scala è denominata L^*); nel processo del trasferimento di energia a cascata questa direzione preferenziale a grande scala si perde, alla scala ridotta le caratteristiche statistiche del moto hanno un carattere generale, ovvero sono le stesse per tutti i flussi

caratterizzati da un numero di Reynolds sufficientemente elevato. Così, Kolmogorov ha introdotto una seconda ipotesi: per numeri di Reynolds molto elevati la statistica del moto alla piccola scala è univocamente determinata dalla viscosità (ν) e dal tasso di dissipazione di energia (ϵ).

Con solo questi due parametri, la lunghezza che può essere derivata da un'analisi dimensionale è: $\eta^* = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}$ ovvero la scala di lunghezza di Kolmogorov.

Un flusso turbolento è caratterizzato da una gerarchia di scale attraverso la quale avviene la cascata dell'energia. La dissipazione di energia cinetica avviene a scale dell'ordine della lunghezza di Kolmogorov η^* , mentre l'input di energia in cascata viene dal decadimento delle scale maggiori dell'ordine di L^* . Queste due scale di lunghezza, estremi della cascata di energia, possono differire di diversi ordini di grandezza ad alti numeri di Reynolds. In mezzo c'è una gamma di scale (ognuna con la propria lunghezza caratteristica r^*), che si è formata a spese dell'energia di quelle di grandi dimensioni. Queste scale sono molto grandi rispetto alla lunghezza di Kolmogorov, ma ancora molto piccole rispetto alla grande scala del flusso (cioè $\eta^* \ll r^* \ll L^*$).

Dato che i vortici di questa gamma sono molto più grandi dei vortici dissipativi che esistono alla scala della lunghezza di Kolmogorov, l'energia cinetica è essenzialmente non dissipata in questa gamma di vortici, ed è semplicemente trasferita alle scale più piccole fino a quando gli effetti viscosi diventano importanti man mano che si appropria alla lunghezza di scala di Kolmogorov. Sempre all'interno di questa gamma gli effetti inerziali sono ancora molto più grandi degli effetti viscosi, ed è possibile supporre che la viscosità non gioca un ruolo nelle loro dinamiche interne (per questo motivo è detto "range inerziale").

Quindi, è introdotta una terza ipotesi da Kolmogorov, ovvero che ad altissimi valori del numero di Reynolds le statistiche nella gamma $\eta^* \ll r^* \ll L^*$ sono universalmente e univocamente determinate dalla lunghezza di scala r^* e dal tasso di dissipazione di energia ϵ .

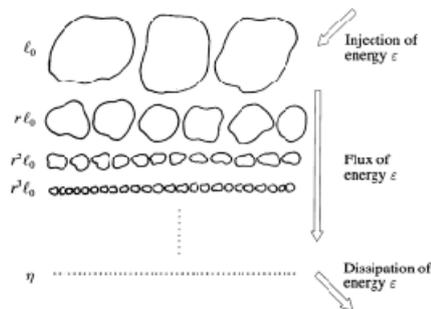


Figura 2.1 Cascata dell'energia (Kolmogorov, 1941)

Da un punto di vista matematico, il concetto di turbolenza è identico al comportamento caotico delle soluzioni delle equazioni di Navier-Stokes. La caratteristica che rende i movimenti turbolenti caotici è una forte sensibilità alle condizioni iniziali presentata dalle Navier-Stokes, in dipendenza tanto maggiore quanto maggiore è il numero di Reynolds.

Infatti, dalla analisi dimensionale, il gruppo adimensionale che governa la transizione da un flusso laminare a turbolento è il numero di Reynolds, che esprime il rapporto tra forze inerziali e forze viscosi. Sembra naturale pensare che per basso numero di Reynolds ci sono situazioni di flusso laminare, mentre alti valori di Reynolds siano propri di flussi turbolenti. Le equazioni di Navier-Stokes sono quindi in grado di rappresentare qualsiasi campo di flusso turbolento, ma la loro risoluzione diretta (Direct Numerical Simulazione, DNS), richiede una griglia con una risoluzione spaziale di dimensioni tali da rappresentare le più piccole strutture turbolente descritte in precedenza, e quindi un elevato costo computazionale.

E' necessario avvalersi di un metodo alternativo basato sulla soluzione numerica del moto medio e l'introduzione dei modelli di turbolenza.

In generale, esistono tre approcci computazionali per il calcolo del flusso turbolento: Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES) e Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

In caso di DNS, la turbolenza non è modellata esplicitamente e tutto è risolto dalla simulazione delle Navier-Stokes; nel secondo caso, viene applicato un filtro spaziale localizzato che rimuove i dettagli alla piccola scala, e nell'ultimo caso, è invece applicato un filtro temporale a lungo tempo con conseguente calcolo del flusso medio, che è costante nel tempo.

Lo sforzo computazionale per il LES è una via di mezzo tra il DNS e l'approccio RANS. Per entrambi gli approcci, LES e RANS, deve essere specificato un modello di chiusura per descrivere l'influenza della turbolenza sul flusso calcolato.

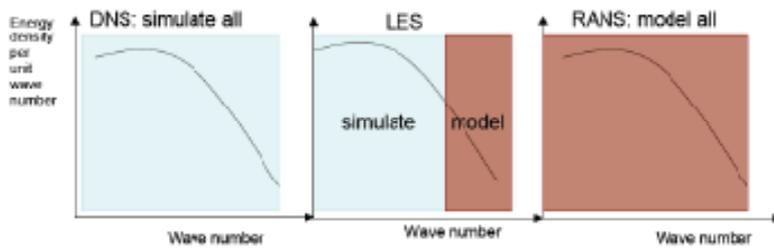


Figura 2.2 Approcci per il calcolo del flusso turbolento

2.3 EQUAZIONI RANS

In generale, tutti i segnali dipendenti dal tempo (in questo caso la velocità) possono essere scomposti in un termine medio ed uno fluttuante. Se il termine medio è costante nel tempo, allora abbiamo:

$$u(x, t) = U(x) + u'(x, t)$$

$$U(x) = \langle u(x, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x, t) dt \quad u'(x, t) = u(x, t) - U(x),$$

in questo caso, ovviamente $\langle u'(x, t) \rangle = 0$.

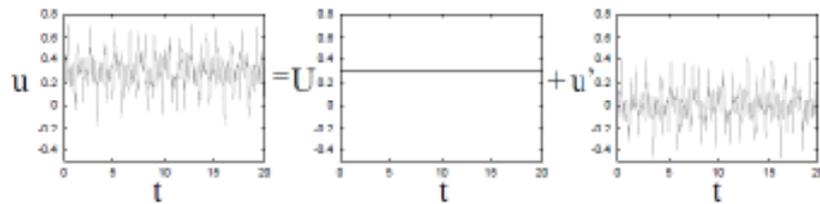


Figura 2.3 Scomposizione di un segnale statisticamente stazionario

Se anche il termine medio è funzione del tempo, allora l'operazione di media non andrebbe fatta su un tempo infinito ma su un intervallo finito che deve essere molto grande comparato alla scala dei tempi della fluttuazione ma piccolo abbastanza comparato alla variazione del campo medio.

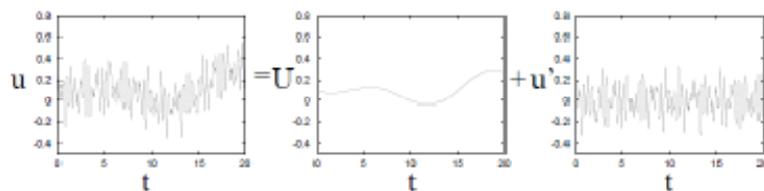


Figura 2.4 Scomposizione di un segnale non statisticamente stazionario

Per un flusso turbolento, il campo di velocità e il campo di pressione possono essere scomposti in due parti: la velocità e la pressione media, $\langle u_i \rangle$ e $\langle p \rangle$, e la velocità e pressione turbolenta, u'_i e p' .

Così $u_i = \langle u_i \rangle + u'_i$ e $p = \langle p \rangle + p'$, in cui $i = 1, 2, 3$ per un flusso tridimensionale.

Se il liquido viene considerato incomprimibile, il campo di flusso medio è governato dalle seguenti equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j}$$

dove ρ è la densità del fluido, g_i i -esima componente dell'accelerazione di gravità, $\langle \tau_{ij} \rangle$ il tensore degli sforzi viscosi del flusso medio.

Per un fluido newtoniano, $\langle \tau_{ij} \rangle = 2\mu \langle \sigma_{ij} \rangle$, con μ viscosità molecolare e

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)$$

tensore di deformazione del flusso medio.

Nell'equazione del momento l'influenza delle fluttuazioni della turbolenza sul campo del flusso medio è rappresentato dal tensore degli stress di Reynolds $\rho \langle u'_i u'_j \rangle$. L'equazione di trasporto per il tensore degli sforzi di Reynolds può essere derivata teoricamente dalle Navier-Stokes.

Purtroppo, l'equazione risultante per il tensore degli sforzi di Reynolds contiene termini di correlazioni tra componenti di velocità turbolenta e pressione turbolenta di ordine superiori (non lineare). Ecco che sono necessarie ipotesi di chiusura per mettere in relazione le correlazioni di ordine superiore del campo di moto turbolento alle caratteristiche del campo di flusso medio, e quindi sono introdotti i modelli di turbolenza.

2.4 MODELLI DI TURBOLENZA

Il modello più diffuso è costituito da due equazioni di trasporto per la energia cinetica turbolenta k e la sua dissipazione ε , il cosiddetto modello $k - \varepsilon$.

Il modello $k - \varepsilon$ ha dimostrato nella sua applicazione nel corso degli anni, di fornire ragionevoli approssimazioni per molti tipi di flussi, anche se a volte richiede la modifica dei suoi parametri adimensionali. Un altro e più recente modello di turbolenza è l'RNG (Renormalization-Group model). Questo approccio applica metodi statistici per derivare le equazioni per le quantità medie di turbolenza, come ad esempio l'energia cinetica turbolenta e il suo tasso di dissipazione. Il modello RNG utilizza equazioni simili alle equazioni per il modello $k - \varepsilon$.

Tuttavia, le equazioni costanti che si trovano empiricamente nel modello $k - \varepsilon$ standard sono derivate esplicitamente (con approccio statistico) nel modello RNG.

In generale, il modello RNG ha un'applicabilità più ampia del modello $k - \varepsilon$ standard. In particolare, il modello RNG è noto per descrivere con più precisione flussi a bassa intensità di turbolenza.

2.4.1 Il modello $k-\varepsilon$

Nell'equazione del momento l'influenza delle fluttuazioni turbolente sul campo di flusso medio è rappresentato dal tensore degli sforzi di Reynolds $\rho \langle u'_i u'_j \rangle$.

$$\rho \langle u'_i u'_j \rangle = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - C_d \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_l} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) + C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) + C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right]$$

Con:

$$k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle = TKE \quad \text{Energia cinetica turbolenta}$$

$$\varepsilon = \nu \left\langle \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle \quad \text{Tasso di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta}$$

$$\nu_t = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Viscosità turbolenta.}$$

I valori raccomandati per i coefficienti sono (Rodi 1980):

$$C_d = 0.09, C_1 = 0.0054, C_2 = -0.0171, C_3 = 0.0027.$$

Le equazioni per k ed ε possono essere derivate direttamente dalle Navier-Stokes.

Il tensore degli sforzi di Reynolds appare solo nelle equazioni del modello $k - \varepsilon$ e solo nel termine di produzione della turbolenza

$$-\langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \langle u'_i u'_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

in cui i coefficienti empirici sono stati determinati con molti esperimenti, i valori raccomandati per questi coefficienti sono (Rodi 1980):

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Le equazioni di Reynolds e le equazioni di trasporto per il $k - \varepsilon$, con le condizioni al contorno appropriate sono state usate per predire con successo molti flussi turbolenti complessi. I coefficienti empirici sono risultati essere sorprendentemente universali.

2.4.2 Il modello RNG

Il modello RNG è stato sviluppato utilizzando il metodo Re-Normalisation Group (RNG) di Yakhot et al. (1986) per rinormalizzare le equazioni di Navier-Stokes, per tenere conto degli effetti del moto alle scale più piccole.

La teoria dell'RNG, applicata alla modellazione della turbolenza, viene utilizzata per eliminare i modi a più alto numero d'onda (cioè la scala più piccola della turbolenza) e sostituire il loro effetto sul flusso restante mediante un piccolo incremento di viscosità effettiva. Le equazioni

risultanti sono riscalate (rinormalizzate) per essere "equivalenti" alle equazioni originarie.

L'iterazione continua fino a quando le equazioni riscalate sono identiche per due iterazioni successive. Uno dei principali vantaggi del metodo RNG è che attraverso espansioni di scala, i coefficienti di turbolenza possono essere teoricamente determinati piuttosto che essere determinati per via empirica. L'approccio RNG produce una equazione per k identica a quella del $k - \varepsilon$ ma una forma modificata dell'equazione per ε :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\nu_t S_{ij} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - R - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

dove R è un modello ad hoc, non derivato dall'analisi RNG, che gioca un ruolo importante nella modellazione dei flussi turbolenti.

Combinando alcuni studi precedenti, Orszag et al. (1996) suggeriscono i seguenti valori dei coefficienti:

$$C_d = 0.085, \quad C_{1\varepsilon} = 1.4, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad \sigma_k = 0.72, \quad \sigma_\varepsilon = 0.72$$

2.4.3 Funzione di parete

E' importante, per completezza, descrivere la dinamica in prossimità della parete di confinamento del fluido.

Nelle vicinanze della parete, la dinamica della turbolenza è significativamente lontana dalle ipotesi di omogeneità e isotropia, e questo implica importanti cambiamenti nei modelli di turbolenza e nella valutazione delle risorse di calcolo richieste dalla simulazione numerica sotto varie tecniche (DNS, LES e RANS).

Così, per lungo tempo, l'applicazione del modello di chiusura della turbolenza è stato limitato a regioni in cui non vi fosse la presenza di parete solida. Tuttavia molti problemi di interesse ingegneristico sono confinati in domini limitati da pareti.

Per compensare questo effetto fisico che manca in una modellazione numerica sono introdotte delle funzioni di smorzamento - $f(y)$ - utilizzate per modificare la viscosità turbolenta. Le funzioni di parete

sono importanti sia da un punto di vista fisico - perché la presenza di pareti solide è tra le principali fonti di vorticità - sia nelle applicazioni di ingegneria - perché i valori alla parete (gradienti di velocità, pressione, etc.) sono molto importanti in diversi applicazioni.

Nel corso degli anni, molti studi sono stati condotti per consentire l'utilizzo di modelli di chiusura della turbolenza in situazioni a basso numero di Reynolds e per descrivere il flusso vicino ad una parete solida. Infatti, un primo effetto importante della parete è la diminuzione del numero di Reynolds localmente.

Inoltre, la risoluzione di un problema di parete richiede notevoli risorse di calcolo in quanto sarebbe necessaria una griglia molto fine per poter descrivere compiutamente i gradienti che nelle vicinanze della parete diventano molto "ripidi".

Una griglia molto fitta riduce drasticamente il passo temporale di calcolo a causa della condizione di stabilità di Courant-Friedricks-Levy ($\Delta t \leq \min\left(\frac{\Delta x}{u}, \frac{\Delta y}{v}, \frac{\Delta z}{w}\right)$) al fine di conseguire la stabilità e/o l'accuratezza.

Inoltre, alla parete la velocità è pari a zero. Tuttavia, se lo stress è calcolato direttamente utilizzando la differenziazione finita e la risoluzione della griglia non è adeguata, ne risultato gravi errori computazionali.

In generale, i modelli di parete sono basati sulla "esistenza" di un profilo di velocità logaritmico in uno strato limite turbolento e la $f(y)$ assume valore unitario lontano dalle pareti e tende esponenzialmente a zero vicino alla superficie solida.

Le funzioni di parete utilizzano, quindi, leggi empiriche per "aggirare" l'impossibilità dei modelli del tipo $k - \varepsilon$ per prevedere un profilo logaritmico di velocità vicino alla parete. Con queste leggi è possibile esprimere la velocità media parallela alla parete e la turbolenza al di fuori del substrato viscoso in funzione della distanza dalla parete.

Quindi, le funzioni di parete possono essere utilizzate per definire le condizioni al contorno vicino alla parete per la quantità di moto e la turbolenza in modo da non dover risolvere lo strato viscoso, evitando di utilizzare quindi una maglia estremamente fitta.

2.5 SPOSTAMENTO DELLA SUPERFICIE LIBERA

Un aspetto molto importante nelle applicazioni ingegneristiche è lo studio di problemi in presenza di una cosiddetta superficie libera. Il motivo della denominazione "libera" nasce dalla grande differenza di densità del gas e liquidi (ad esempio, nel caso di problemi idraulici classici, il rapporto tra densità dell'acqua e dell'aria è 1000).

Una bassa densità del gas significa che la sua inerzia può essere generalmente ignorata rispetto a quella del liquido. In questo senso il liquido si muove indipendentemente, o liberamente, nei confronti del gas. L'unica influenza del gas è la pressione che esso esercita sulla superficie del liquido. In altre parole, l'interfaccia gas-liquido non è vincolata ma libera. Anche le superfici libere richiedono l'introduzione di metodi speciali per definirne la loro ubicazione, il loro movimento e la loro influenza sul flusso che si sta studiando.

Indipendentemente dal metodo utilizzato, ci sono tre caratteristiche essenziali che è necessario tener presente per modellare adeguatamente le superfici libere:

- uno schema per descrivere la forma e la posizione della superficie,
- un algoritmo per l'evoluzione nel tempo della forma e posizione della superficie,
- adeguate condizioni al contorno definite sulla superficie libera.



Figura 2.5 Elevazione della superficie libera in funzione del tempo

In letteratura sono descritti diversi metodi per il trattamento numerico della superficie libera, il più usato e testato è il metodo del Volume of Fluids (VOF), che è adottato anche per il presente lavoro di ricerca.

2.5.1 Metodo VOF (Volume Of Fluid)

Il metodo VOF (Hirt e Nichols, 1981) è usato per descrivere l'articolata superficie di contatto che si genera tra due fluidi (ad esempio aria e acqua). Con il metodo VOF si introduce una funzione di volume di fluido F per definire la regione occupata dall'acqua. Il significato fisico della funzione F è rappresentato, sostanzialmente, dalla frazione di cella occupata dall'acqua. In particolare, un valore unitario di F corrisponde ad una cella piena d'acqua, mentre un valore zero indica che la cella non contiene acqua. Celle con valore di F compreso tra zero ed 1 devono contenere la superficie libera (cfr. Figura 2.6).

La funzione F frazionaria può essere valutata come segue:

$$F = \frac{V_w}{V_c}$$

dove V_w è il volume di acqua all'interno di una cella e V_c è il volume della cella.

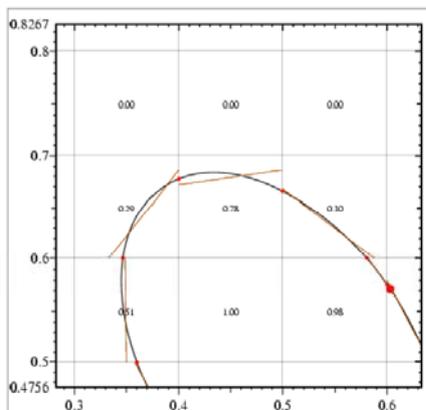


Figura 2.6 Esempio di valori di F con algoritmo VOF

Esistono diversi algoritmi per il tracciamento della superficie libera, ma sostanzialmente consistono tutti di due fasi. Nella prima fase, l'interfaccia è approssimata da un segmento lineare che divide ogni cella in maniera tale che il volume racchiuso dal segmento sia pari al valore della funzione frazionaria tra zero e uno.

Nella seconda fase, l'interfaccia è tracciata risolvendo l'equazione che descrive l'evoluzione della funzione frazionaria F nel tempo. L'equazione di trasporto della funzione F è data da:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0$$

Utilizzando la definizione della funzione F , la densità e la viscosità possono essere espressi in termini di F stesso come:

$$\begin{aligned} \rho &= (1 - F)\rho_a + F\rho_w \\ \nu &= (1 - F)\nu_a + F\nu_w \end{aligned}$$

dove ρ_a e ν_a sono rispettivamente la densità e la viscosità dell'aria; ρ_w e ν_w sono la densità e viscosità dell'acqua.

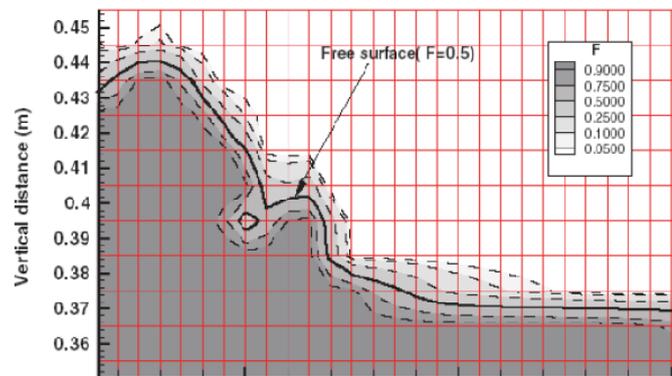


Figura 2.7 Valori tipici della funzione VOF vicino a superficie libera

Il processo di ricostruzione dell'interfaccia, quindi, non è unico visto che la geometria dell'interfaccia, data una certa distribuzione del campo F , dipende dall'algoritmo di ricostruzione implementato.

Uno dei modi per ricostruire l'interfaccia è descritto, ad esempio, dall'algoritmo detto VOF/PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation), che approssima l'interfaccia mediante un segmento di retta, determinando la normale del segmento per ogni singola cella a partire dal gradiente della funzione F .

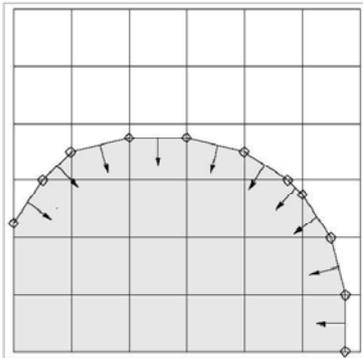


Figura 2.8 Approssimazione della superficie libera e definizione delle normali con VOF

In generale il metodo VOF è estremamente utile per la risoluzione di problemi con l'utilizzo di griglie di calcolo a nodi fissi, dove la superficie libera deve avere la possibilità di assumere le più svariate e complesse posizioni nel tempo. Per esempio, nelle simulazioni del moto ondoso, le onde a volte si “ribaltano” su se stesse creando l'intersezione delle interfacce delle celle che si fondono tra loro. Il metodo VOF tiene conto di questo automaticamente nell'algoritmo di risoluzione. Se si conosce la quantità di liquido in ogni cella è possibile individuare le superfici, così come determinarne le pendenze e curvatures.

Le superfici sono di facile individuazione perché si trovano in celle parzialmente riempite con fluido o tra quelle piene di fluido e quelle vuote. Per ogni cella e per ogni istante di tempo, le relative pendenze e curvatures sono calcolate utilizzando le frazioni di volume del fluido nelle cellule adiacenti.

2.6 CONDIZIONI AL CONTORNO

Per continuare la descrizione matematica del problema, è necessario definire opportune condizioni al contorno su tutti i lati del dominio computazionale. Per problemi dipendenti dal tempo devono essere specificate anche condizioni iniziali, il che significa che i valori di tutte le variabili dipendenti dal tempo devono essere definiti per un certo istante di tempo (di solito prese in $t = 0$).

Nel caso di simulazioni riproducenti esperimenti di laboratorio inerenti l'interazione moto ondoso-strutture marittime, si ricrea numericamente un canale considerato impermeabile alle pareti laterali destra e sinistra e sul fondo, mentre è considerato aperto all'aria verso l'alto. Al confine impermeabile le condizioni di velocità imposte sono le seguenti:

$$u_n = 0; \frac{\partial u_s}{\partial n} = 0$$

dove n è la coordinata nella direzione normale alla superficie impermeabile, u_n la componente della velocità normale e u_s la componente di velocità lungo la superficie. Il gradiente di pressione alle pareti sinistra e destra è impostato a zero, mentre per i limiti superiore ed inferiore è semplicemente il prodotto della densità per l'accelerazione gravitazionale (gradiente di pressione idrostatica).

Sull'interfaccia tra aria e acqua, la condizione al contorno è di tipo cinematico ed è soddisfatta dall'equazione della funzione VOF; la pressione sulla parte superiore del dominio è posta uguale a zero. Al lato del canale numerico coincidente con l'ingresso del fluido è considerato un generatore di onda (cfr. paragrafo 2.8.3). Per le condizioni al contorno sulla parete finale della vasca, nei problemi di propagazione delle onde, sono state sviluppate speciali condizioni che cercano di determinare la velocità e la direzione delle onde nell'avvicinarsi al confine e quindi impostare condizioni al contorno in modo tale da consentire la loro continuazione attraverso il confine minimizzando la riflessione. Per i problemi di propagazione delle onde, è naturale cercare una condizione al contorno che permetta alle onde in uscita di lasciare senza problemi la griglia di calcolo con una riflessione minima.

Questo problema è analogo a quello che avviene nella realtà sperimentale dove vengono posti in vasca dei sistemi per l'assorbimento delle onde, dove appunto si vuole eliminare la riflessione. Nelle vasche sperimentali

è usata una varietà di tecniche, ma quasi tutte sono basate sul principio di dissipare l'energia (ad esempio, l'utilizzo di spiaggia porosa).

2.7 IMPLEMENTAZIONE NUMERICA

2.7.1 Sistemi basati su griglia

Il termine inglese “gridding” indica il processo di suddivisione di una regione di calcolo in una serie di volumi di controllo di piccole dimensioni. Ad ogni volumetto di controllo sono associati i valori di più variabili dipendenti caratterizzanti il flusso (ad esempio, velocità, pressione, temperatura, etc.). Di solito questi valori sono rappresentativi di un certo tipo di media locale dei valori. Vengono poi utilizzati degli algoritmi numerici che permettono la risoluzione delle leggi di conservazione della massa, della quantità di moto e dell’energia in maniera approssimata per calcolare i valori delle variabili in ogni singolo volumetto di controllo per ogni istante di tempo. In sintesi, la scelta migliore per una griglia di calcolo dipende da diversi fattori: la memoria necessaria per il calcolo, la precisione numerica che si vuole ottenere, la flessibilità necessaria per conformarsi alle geometria eventualmente complessa in studio, e la flessibilità per alcune regioni dove è necessaria una risoluzione più o meno alta.

Alcuni programmi di calcolo utilizzano griglie computazionali che si deformano per seguire il movimento del fluido (griglie Lagrangiane), mentre altri utilizzano griglie fisse (griglie Euleriane).

A volte è possibile utilizzare una combinazione in modo che le griglie mobili non si distorcano eccessivamente (griglie Lagrangiane-Euleriane).

Le griglie possono essere strutturate o non strutturate. Una griglia strutturata significa che gli elementi di volume sono ben ordinati, e uno schema semplice (per esempio basato sugli indici i,j,k) può essere usato per etichettare e identificare gli elementi vicini. In griglie non strutturate, gli elementi di volume possono essere uniti in qualsiasi modo, e devono essere generate speciali liste per identificare gli elementi vicini.

Le griglie strutturate sono disponibili in diverse varietà, a seconda della forma dei loro elementi, la griglia più semplice è generata da una box rettangolare suddivisa in una serie di elementi rettangolari più piccoli le cui facce sono parallele alle facce della box esterna. Il più delle volte gli elementi sono ordinati contando in x , y ed infine nella direzione z , in modo che gli elementi di rete (i,j,k) corrispondono all' i -esimo elemento nella direzione x , y e z .

Le griglie composte da elementi regolari hanno la struttura più semplice poiché è solo necessario definire tre array monodimensionali per i valori della x, della y e della z per le superfici che definiscono l'elemento. Se i,j,k sono gli indici nelle direzioni x, y, z, il numero totale di valori necessari per definire la griglia è $i+j+k$.

Le griglie rettangolari con elementi di dimensioni variabili gradualmente hanno una intrinseca regolarità che aiuta a mantenere la precisione numerica.

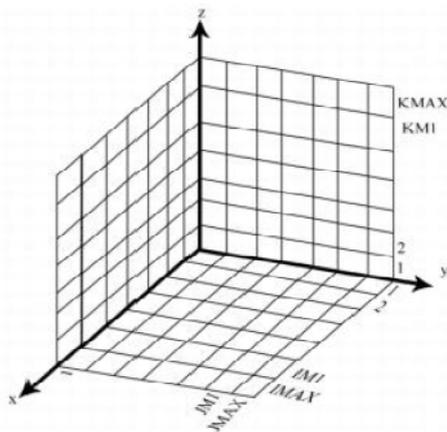


Figura 2.9 Sistemazione griglia e convenzioni etichettatura

2.7.2 Condizione di stabilità

Nel calcolo del dominio del tempo, la stabilità della risoluzione che è in relazione con la convergenza della soluzione numerica è assicurata applicando criteri di stabilità.

Il passo temporale di calcolo in fluidodinamica computazionale è generalmente non uniforme e regolato in modo che il fluido non attraversi più di una cella di calcolo nel tempo Δt , ed è limitata dalla condizione di Courant-Friedrichs-Levy $\Delta t \leq \min(\Delta x/u, \Delta y/v, \Delta z/w)$ e da una condizione di tipo diffusivo, e cioè, fisicamente, sulla possibilità che le grandezze non si diffondano approssimativamente in più di una cella per step temporale di calcolo.

2.8 METODOLOGIE NUMERICHE PER LA MODELLAZIONE RANS/VOF

2.8.1 Descrizione generale dei modelli RANS/VOF

Attualmente esistono diversi codici numerici in cui sono implementati i modelli descritti in precedenza, ampiamente usati in generale nel campo della fluidodinamica computazionale e, nel particolare, in applicazioni di idraulica marittima con soddisfacenti risultati.

I modelli numerici comprendenti le equazioni di Navier-Stokes, integrati con modelli di turbolenza e con algoritmi di tracciamento della superficie (RANS / VOF), sono allo stato attuale ampiamente capaci di descrivere con dettaglio correttamente il comportamento dei fluidi a superficie libera che interagiscono con spiagge, strutture marittime, sia in 2D che in 3D.

Originariamente, il metodo RANS / VOF è stato sviluppato da Lin e Liu (1998), successivamente adoperato e affinato da diversi autori, è attualmente pienamente affidabile (ad esempio Christensen, 2006). Inoltre, esistono anche metodi si può dire innovativi, di tipo Lagrangiano come l'SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic), che con molta probabilità saranno presto in grado di competere con i metodi di tipo euleriano (Dalrymple et al 2006; Shao et al 2006). Anche se attualmente non c'è un'approfondita conoscenza per quel che riguarda le applicazioni ai problemi inerenti il moto ondoso, alcuni autori stanno sviluppando la tecnica in questo campo (Viccione et al 2008).

I software basati sul modello RANS / VOF più comunemente usati per calcoli di tipo marittimo sono il COBRAS (CORNELL Breaking waves And Structures), sviluppato in origine da Lin (1998) presso la Cornell University e, da pochi anni a questa parte, il FLOW-3D sviluppato dalla Flow-Science (Bradford, 2000; Chopakatla et al, 2008; Dentale et al 2008, 2009, 2010a-b).

Il lavoro di ricerca discusso in questa tesi è stato realizzato usando il software FLOW-3D, ampiamente testato dal gruppo MEDUS del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno. Come specificato nel seguito l'utilizzo del software è sempre stato preceduto da un'attenta analisi di sensibilità della griglia, di consistenza dei risultati al variare del modello di turbolenza utilizzato, nonché da un confronto con

le esperienze già maturate all'interno del gruppo di ricerca per l'ottimizzazione delle simulazioni in studio.

FLOW-3D utilizza un metodo VOF per il tracciamento della superficie libera (cfr paragrafo 2.5.1) e la funzione FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Regions) per modellare geometrie complesse nel dominio di calcolo (Hirt e Sicilian, 1985). La parte del volume o area occupata da un oggetto/ostacolo in ogni cella è definita all'inizio dell'analisi, così da calcolare la frazione di fluido contenuta in ogni cella. Le equazioni di continuità, quantità di moto e di trasporto sono formulate in funzione della funzione FAVOR per ogni cella, discretizzate alle differenze finite. I valori che assumono le grandezze sono riferiti alla singola cella come mostrato in Figura 2.10: le componenti di velocità e le frazioni areali della cella sono riferite alle facce nelle tre direzioni, le altre grandezze al centro della cella (pressione (P), densità (ρ), frazione di fluido (F), energia interna (I), turbolenza (q), dissipazione (D) e viscosità (μ)).

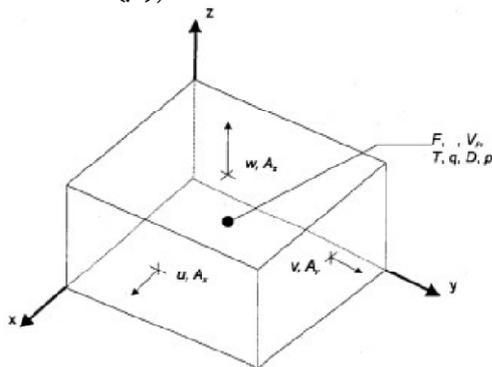


Figura 2.10 Ubicazione delle variabili in una generica cella della griglia di calcolo

La procedura di base per l'avanzamento della soluzione nel tempo mediante uno step temporale dt consiste in tre passi:

- è usata una discretizzazione esplicita delle equazioni di Navier-Stokes per calcolare la distribuzione delle velocità al tempo successivo usando le condizioni iniziali o i valori dell'intervallo temporale precedente;
- per soddisfare l'equazione di continuità le pressioni sono corrette iterativamente in ogni cella e le variazioni di velocità, indotte dai cambiamenti delle pressioni, sono aggiunte a quelle calcolate allo

step precedente. E' necessaria un'iterazione perché il cambiamento delle pressioni di una cella sbilancia i valori delle sei celle adiacenti;

- infine, quando c'è un problema di superficie libera o un'interfaccia tra fluidi diversi, viene utilizzata l'equazione dell'algoritmo VOF per dare la nuova configurazione del fluido.

2.8.2 Procedura di simulazione

Le fasi di base della procedura di simulazione sono le seguenti:

1. creare o importare il file per definire la geometria del problema in studio;
2. creare la griglia di calcolo coerentemente alla geometria degli ostacoli;
3. specificare le condizioni al contorno;
4. specificare il tipo di fluido, le condizioni iniziali, i modelli numerici da attivare per il calcolo (ad es. turbolenza);
5. selezionare le opzioni di output (ad es. intervallo di campionamento dei risultati);
6. regolare i parametri associati ai metodi numerici (controllo passo temporale, controlli solutore esplicito/implicito, etc.);
7. avviare il solutore;
8. verificare la correttezza della soluzione ottenuta.

2.8.3 Generazione del moto ondoso

La generazione del moto ondoso è un aspetto fondamentale, ampiamente studiato, sia per gli esperimenti fisici in vasca che per quelli numerici.

Nella modellazione fisica di laboratorio si utilizza una strumentazione abbastanza sofisticata di cui l'ondogeno rappresenta la parte fondamentale. Sono meccanismi costituiti da un sistema di palette o di pistoni che con il loro movimento, controllato da un software, producono l'agitazione ondosa.

Sono sostanzialmente di due tipi: flap motion e piston paddle motion.



Figura 2.11 Ondogeno con sistema "Piston Paddle Motion"



Figura 2.12 Ondogeno con sistema "Flap Motion"

I primi sono costituiti da pale incernierate superiormente o inferiormente che con il loro movimento inducono all'acqua una velocità sia in direzione verticale che orizzontale; i secondi sono formati da pistoni a comando idraulico, in uno o più elementi, che possono spostarsi solo in orizzontale. L'utilizzo dell'uno o dell'altro tipo è dettato dalle condizioni in cui viene effettuata la sperimentazione e dalle caratteristiche del fenomeno da riprodurre. Ad esempio per strutture con elevati livelli d'acqua, quindi di acque alte, è più opportuno utilizzare il flap motion dato che il movimento delle particelle d'acqua è praticamente concentrato in superficie; nel caso di acque basse invece il piston paddle motion è più efficiente in quanto fornisce una velocità costante lungo la verticale, come si ottiene dalla teoria. (Dean e Dalrymple 1984).

Nelle simulazioni numeriche ci sono due possibilità diverse per modellare la generazione del moto ondoso. La prima opzione è quella di generare le onde definendo nelle celle di calcolo iniziali del dominio l'elevazione della superficie libera, η , e le due componenti (orizzontale e verticale) della velocità della particella d'acqua. In alternativa, le onde possono essere generate utilizzando un oggetto solido che si può spostare orizzontalmente e/o ruotare su diversi assi, imitando proprio il comportamento di un paddle fisico da laboratorio. Il primo metodo è quello di cui si è fatto uso nel presente lavoro di tesi.

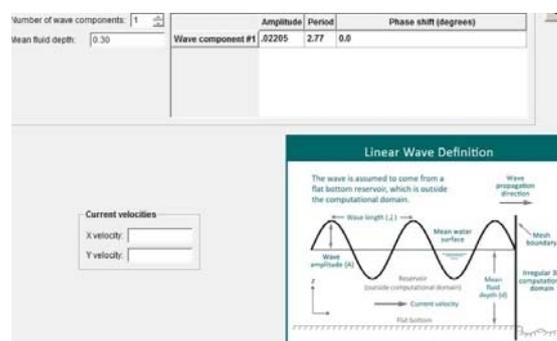


Figura 2.13 Interfaccia per la generazione del moto ondoso in FLOW-3D

2.8.4 Generazione del moto ondoso usando la teoria descrittiva delle onde lineari

Come accennato in precedenza, il software ha implementato un generatore ondoso interno che si basa sulla teoria descrittiva delle onde. L'onda è generata imponendo sostanzialmente le componenti di velocità al confine del dominio di calcolo da cui entra il flusso. Possono essere usate diverse teorie per descrivere l'onda in ingresso, la più semplice è la teoria lineare (onda di Airy), assumendo però che possono essere generate con buona precisione solo le onde di piccola ampiezza, ammettendo un margine di errore crescente al crescere dell'altezza d'onda simulata.

Come mostrato nella figura seguente, l'onda lineare entrante nel dominio di calcolo si assume provenire da un serbatoio a fondo piatto, quindi

completamente sviluppata. L'onda lineare è caratterizzata dalla ampiezza d'onda A , la lunghezza d'onda L , la frequenza ω e il numero d'onda $k = 2\pi/L$.

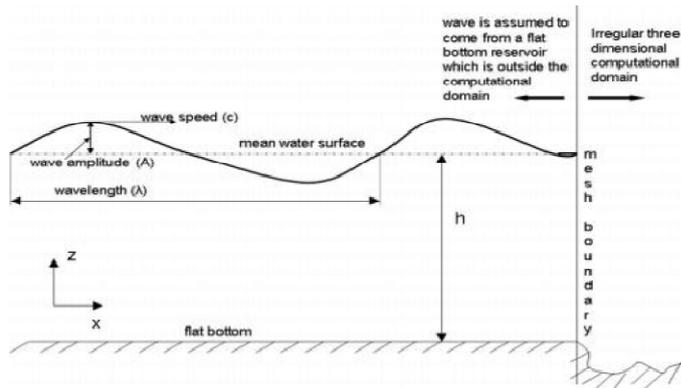


Figura 2.14 Onda lineare proveniente da un serbatoio a fondo entrante nel dominio computazionale (FLOW-3D user manual)

L'evoluzione della superficie libera di un'onda può essere descritta in funzione della coordinata in direzione verticale:

$$z = \eta(x, t)$$

con:

$$\eta(z, t) = A \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

dove φ è l'angolo di sfasamento.

La teoria lineare delle onde è basata sulle seguenti ipotesi:

- fluido incompressibile, inviscido, flusso irrotazionale bidimensionale;
- l'onda viene generata in acqua ferma (non ci sono correnti);
- approssimazione di Stokes: l'ampiezza dell'onda (A) è piccola in confronto alla profondità dell'acqua (d) e alla lunghezza d'onda (L).

Con le ipotesi precedenti, il problema delle onde può essere ridotto ad un'equazione di Laplace, la cui soluzione è data da:

$$\phi(x, y, t) = \frac{A\omega \cosh[k(z + d)] \sin(kx - \omega t + \varphi)}{k \sinh(kd)}$$

dove Φ è la funzione potenziale.

Le componenti orizzontali e verticali della velocità del fluido possono essere determinate come:

$$u(x, y, t) = \frac{A\omega \cosh[k(z+d)] \cos(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kd)}$$
$$w(x, y, t) = \frac{A\omega \cosh[k(z+d)] \sin(kx - \omega t + \varphi)}{\sinh(kd)}$$

La velocità dell'onda $c = \omega/k$ si esprime come:

$$c^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

dove d è la profondità media del fluido.

Questa relazione implica che la frequenza dell'onda e la lunghezza dell'onda non sono indipendenti ma sono correlate come:

$$\omega^2 = \frac{2\pi g}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

L'utente può specificare la frequenza dell'onda o la lunghezza dell'onda da generare, l'altra quantità sarà calcolata automaticamente dal codice. Una volta che l'onda è entrata nel dominio di calcolo, la superficie inferiore del dominio può essere di forma generica, non più piatta, nel qual caso l'onda subirà i relativi processi di trasformazione deviando dai risultati della teoria lineare.

3 STUDIO NUMERICO SULLE SPERIMENTAZIONI DI VIDAL ET AL. (2001)

Per la ricerca sulla modellazione numerica del comportamento delle barriere sommerse si sono presi come riferimento gli esperimenti fisici condotti nell'ambito del progetto DELOS "Environmental Design of Low Crested Coastal Defence Structures" presso il laboratorio di ingegneria costiera dell'Università di Cantabria, Spagna (Vidal et al., 2001). L'analisi descritta nelle pagine che seguono è volta alla calibrazione e al confronto del codice di calcolo FLOW-3D con i risultati sperimentali ottenuti dagli autori nonché al confronto con i risultati ottenuti e descritti da Garcia et al., 2004 ("*2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters*"), i quali utilizzano anch'essi un modello basato sulle equazioni RANS (COBRAS).

3.1 DESCRIZIONE DEL SET-UP SPERIMENTALE E NUMERICO

Gli esperimenti su modello fisico sono stati condotti in un canale di 24.05m di lunghezza, largo 0.60m e alto 0.80m, corredato da un generatore di moto ondoso a pistone munito di un sistema di assorbimento attivo per le onde riflesse (AWACS, Active Wave Absorption System) nonché un sistema che permette di ricircolare l'acqua dalla fine all'inizio della vasca (Vidal et al., 2001).

In questo set di esperimenti sono state analizzate due strutture sommerse con cresta larga 25cm e 1m, realizzata in materiale granulare (nucleo e mantellata) con le seguenti caratteristiche:

Tabella 3.1 Caratteristiche del materiale utilizzato in laboratorio per la barriera Vidal et al., 2001)

| | W_{15} (g) | W_{50} (g) | W_{85} (g) | Porosità | Densità (kg/m ³) |
|------------|--------------|--------------|--------------|----------|------------------------------|
| Mantellata | 119 | 153 | 206 | 0.53 | 2647 |
| Nucleo | 3.14 | 4.31 | 5.60 | 0.49 | 2607 |

Prima e dopo la struttura è presente un piano inclinato con pendenza 1:20 realizzato in Plexiglas, nella parte posteriore della struttura è presente un foro di 8cm che permette all'acqua di entrare nel sistema di ricircolo che non è forzato da una pompa esterna, in questo caso, ma è funzionante a gravità (Figura 3.1).

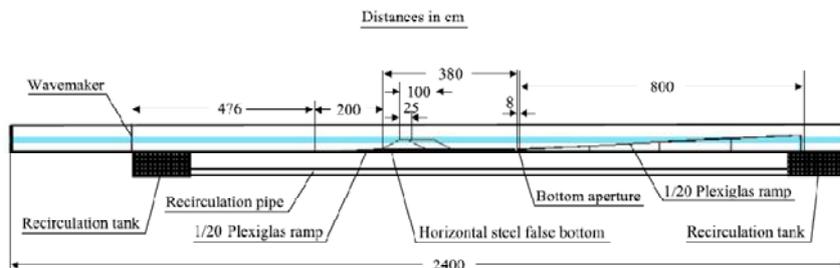


Figura 3.1 Set up sperimentale usato da Vidal et al., 2001

Le misure effettuate in laboratorio hanno riguardato profili di velocità orizzontale e verticale in corrispondenza della struttura, pressione all'interno della struttura (sul fondo), oscillazione della superficie libera. Le stesse posizioni degli strumenti di misurazione in laboratorio sono state usate per il canale numerico da Garcia et al. al fine di effettuare i dovuti confronti necessari per la calibrazione (Figura 3.2).

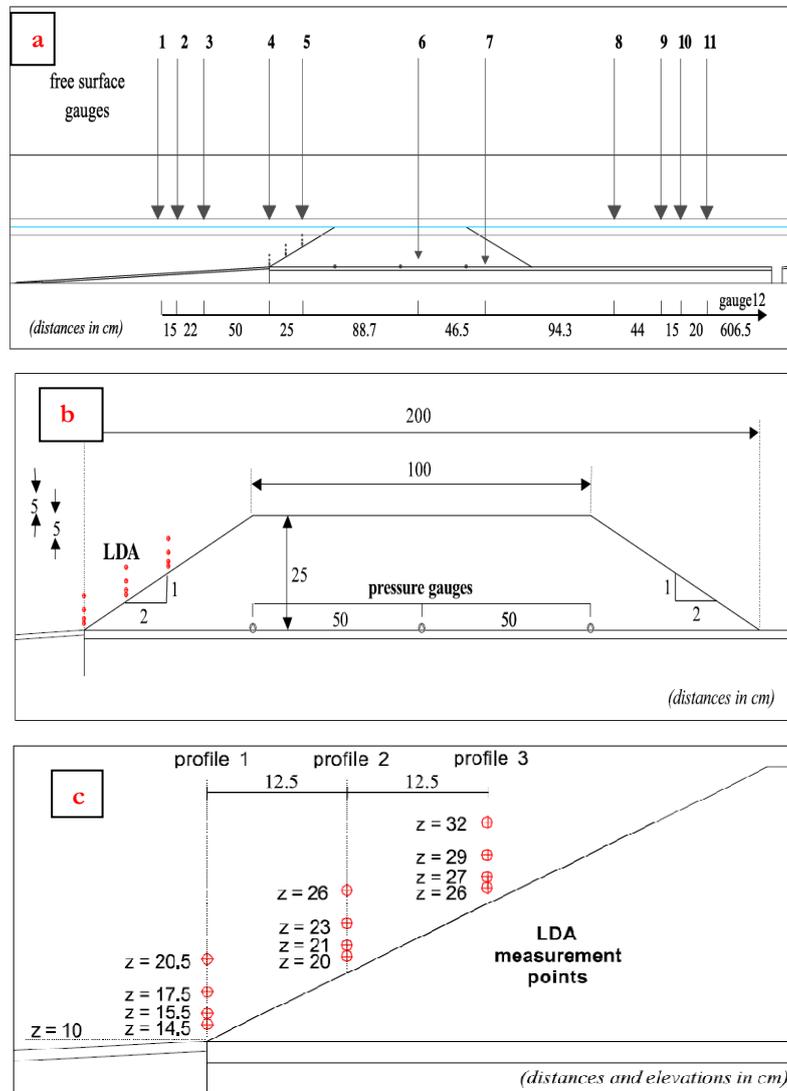


Figura 3.2 Punti di misurazione usati da Vidal et al. (2001): a) oscillazione pelo libero, b) pressioni, c) velocità.

I test di laboratorio hanno riguardato onde regolari di differente altezza e periodo, variando l'altezza d'acqua presente in vasca (profondità) passando quindi da struttura sommersa ad emersa.

Tabella 3.2 Caratteristiche del moto ondoso e delle profondità nelle prove di laboratorio (Vidal et al., 2001)

| | | |
|----------------|-------|------------------|
| Altezza d'onda | H (m) | 0.05, 0.10, 0.15 |
| Periodo d'onda | T (s) | 1.6, 2.4, 3.2 |
| Profondità | h (m) | 0.30, 0.35, 0.40 |

Numericamente, Garcia et al. riproducono lo stesso set-up sperimentale con una struttura sommersa realizzata con due solidi con caratteristiche di porosità e permeabilità uguali a quelle di laboratorio. Anche in questo caso realizzano al fondo del canale numerico un tubo per il ricircolo dell'acqua funzionante a gravità a partire dal retro della struttura (Figura 3.3). La mesh di calcolo è uniforme nella direzione verticale (1cm) ma non uniforme in orizzontale, suddividendo il dominio in 4 regioni con un Δx variabile da 4 ad 1cm. La generazione del moto ondoso è realizzata con una sorgente di massa all'interno del dominio di calcolo posta dopo uno sponge layer necessario per limitare la riflessione.

Per modellare i due componenti porosi formanti la struttura è stata necessaria una fase di calibrazione per definire i valori dei parametri alfa e beta per la perdita di carico lineare e quadratica del modello poroso implementato nel software (Hsu et al. 2002, Dentale et al. 2010a-b). I valori, ottenuti a valle del confronto tra le oscillazioni del pelo libero in vasca con quelle numeriche, nonché delle pressioni all'interno della mantellata per il caso $H=7\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$, $R_c=-5\text{cm}$, sono i seguenti:

Tabella 3.3 Valori dei coefficienti Alfa e Beta per la caratterizzazione del mezzo poroso

| | Nucleo | Mantellata |
|------|--------|------------|
| Alfa | 1000 | 1000 |
| Beta | 1.2 | 0.8 |

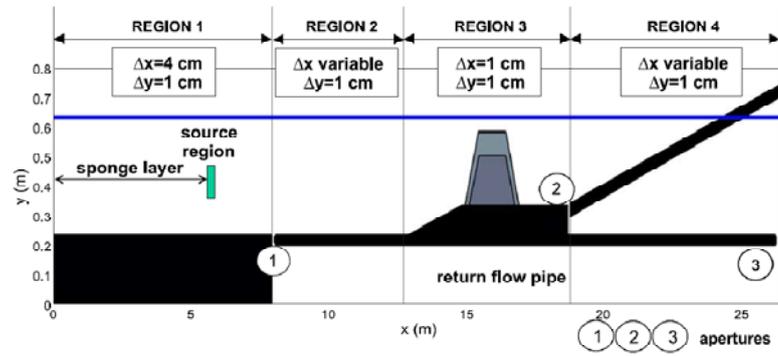


Figura 3.3 Schema della mesh di calcolo usata in Garcia et al. (2004) con sistema di ricircolo

3.2 DESCRIZIONE DELLA MODELLAZIONE NUMERICA

Si è riprodotto numericamente lo stesso esperimento realizzato con il COBRAS da Garcia et al., considerando quindi la barriera soffolta come mezzo poroso ed utilizzando un sistema di ricircolo dell'acqua, mantenendo le stesse dimensioni geometriche. La differenza sta nella generazione del moto ondoso che, in questo caso, è effettuata in maniera diversa, come descritto nel paragrafo 2.8.3. Si ricorda in breve che l'onda entra nelle prime celle del dominio di calcolo attraverso l'imposizione del profilo di velocità orizzontale e verticale, calcolato a partire dalla teoria lineare, per ogni istante di calcolo.

Le prime simulazioni sono state indirizzate alla verifica della corretta discretizzazione del dominio di calcolo. Si sono usate tre griglie, due uniformi con celle quadrate di dimensioni 1x1cm e 0.5x0.5cm e quella variabile utilizzata nell'articolo esaminato, la cui figura è stata presentata in precedenza. Per questo caso le celle delle regioni 2 e 4 sono state realizzate con un ΔX fisso pari a 2cm e non variabile come mostrato invece nella figura degli autori presi come riferimento (Figura 3.3).

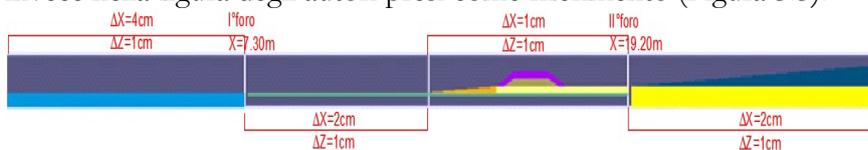


Figura 3.4 Discretizzazione del dominio di calcolo

Nello schema implementato in FLOW-3D vi è un fondo piano a profondità costante, dalle prime celle di generazione del moto ondoso entrante nel dominio fino alla barriera, della lunghezza di 13m, a seguire il piano inclinato con pendenza 1/20 lungo 2m in proiezione orizzontale prima dell'inizio della barriera soffolta. Successivamente, dopo il secondo foro verticale per il sistema di ricircolo, inizia la spiaggia sempre con pendenza 1/20. La lunghezza totale del dominio di calcolo è 27m, tutti i componenti sono impermeabili a meno della barriera (mantellata e nucleo) che sono invece modellati come mezzi porosi, come detto in precedenza.

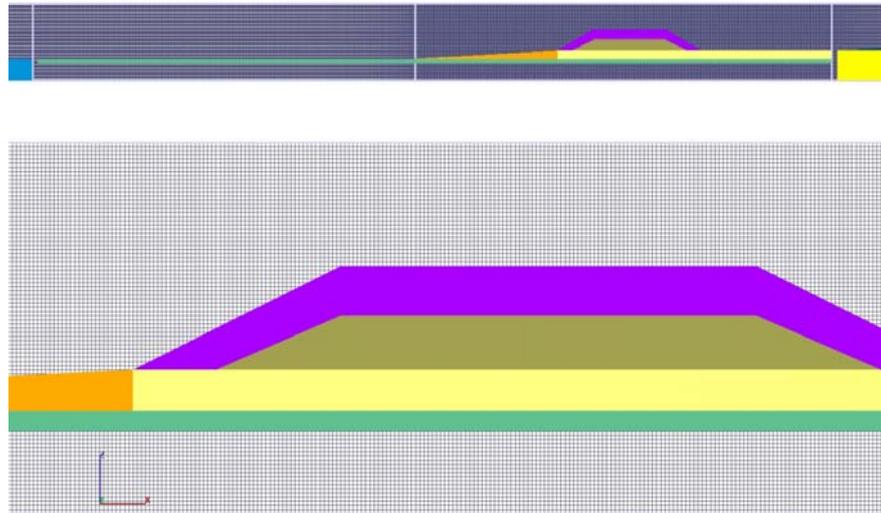
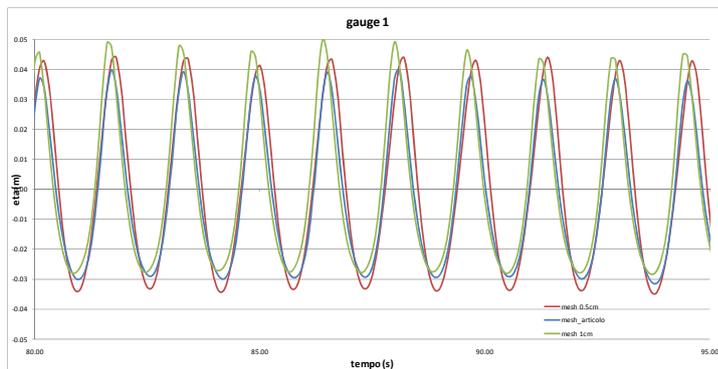
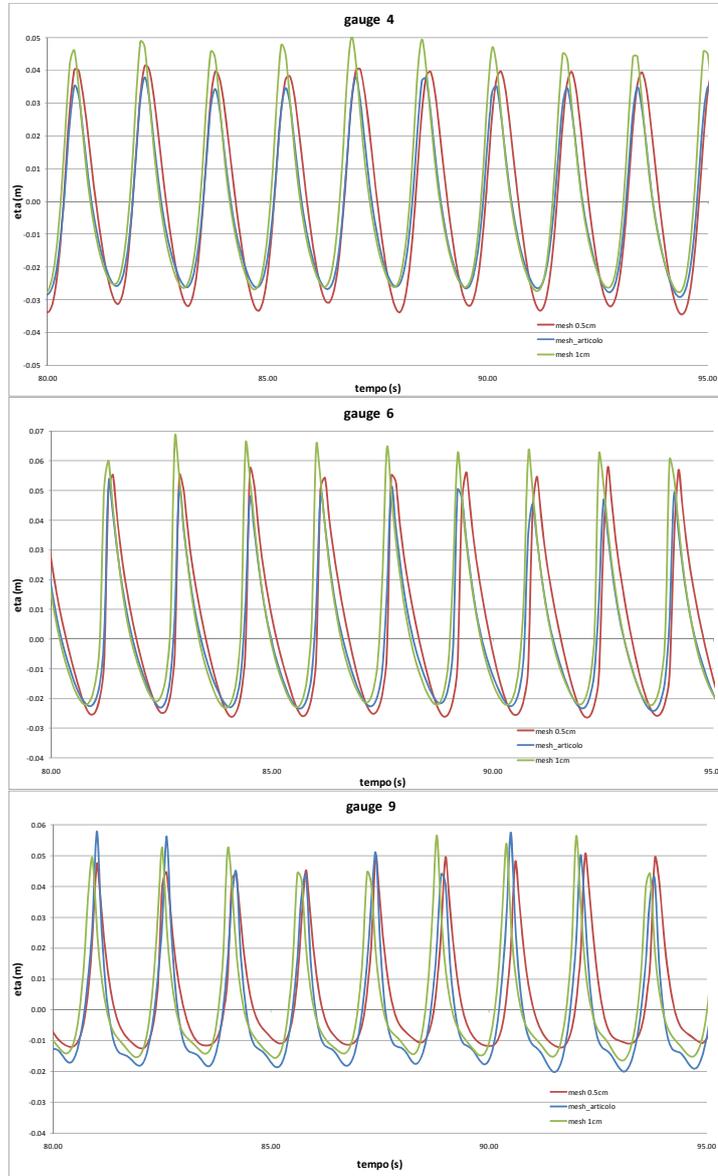


Figura 3.5 Particolare della griglia di calcola utilizzata in FLOW-3D

3.3 CALIBRAZIONE

Il test utilizzato per la calibrazione ha previsto l'impostazione al generatore di un'onda regolare di altezza $H=7\text{cm}$ e periodo $T=1.6\text{s}$ su di un fondale al largo $h=40\text{cm}$. Il valore di altezza d'onda imposto al generatore, è quello cosiddetto di target, ovvero un valore nominale che rappresenta l'altezza d'onda che si otterrebbe in condizioni ideali nella vasca. In questo caso le simulazioni sono state condotte senza l'utilizzo di un modello di turbolenza (caso laminare), considerando attivo il sistema di ricircolo funzionante a gravità. Nelle figure seguenti si riporta l'andamento delle Eta calcolate per le diverse mesh in diversi punti del dominio (gauges cfr. Figura 3.6). Si nota una differenza tra i diversi risultati ma dal confronto di questi con i grafici presentati nel lavoro di Garcia et al. si nota come l'utilizzo della stessa mesh utilizzata dagli autori fornisca un migliore accordo con i valori misurati in vasca anche in questa analisi (cfr Figura 3.7). Per questo motivo si è deciso di continuare le elaborazioni successive utilizzando la stessa mesh di calcolo usata nell'articolo (non uniforme nella direzione X).





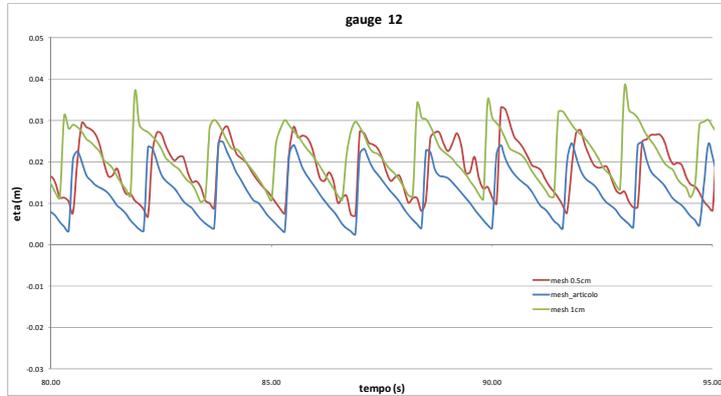
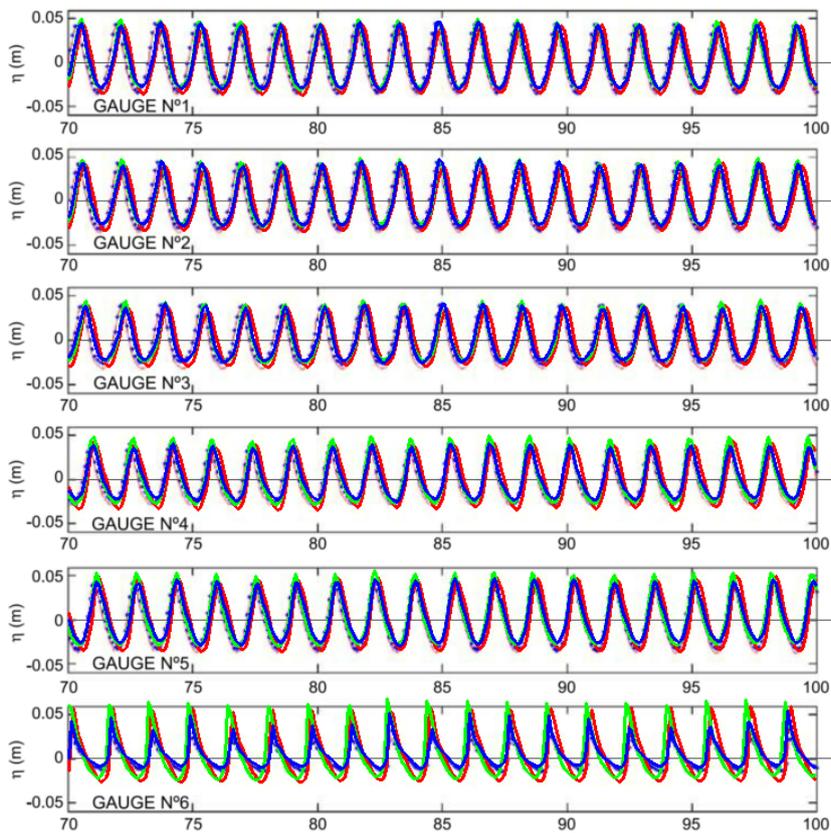


Figura 3.6 Andamento delle Eta registrati a diversi gauge per le tre mesh utilizzate (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm)



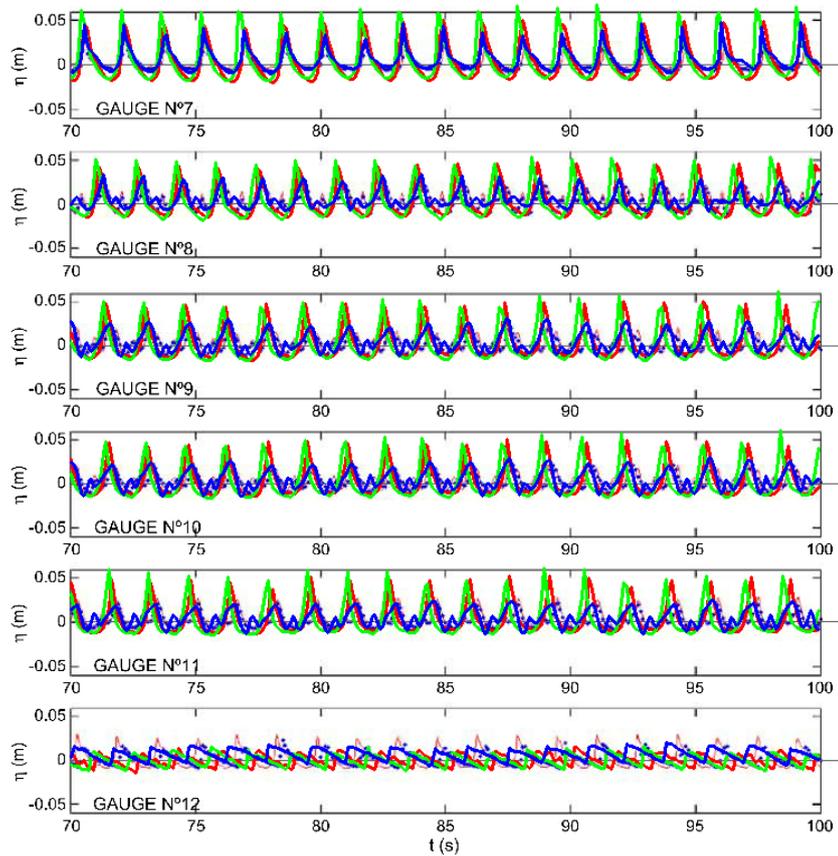


Figura 3.7 Calibrazione Eta ai diversi gauge (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm)

È stato analizzato anche l'andamento del set-up per le tre mesh di calcolo utilizzate, nel grafico seguente sono riportati gli andamenti di Eta medio, $\text{Eta}_{\max} - \text{Eta}_{\text{medio}}$, $\text{Eta}_{\min} - \text{Eta}_{\text{medio}}$. L'andamento è compatibile, maggiormente per la mesh_articolo (in blu in Figura 3.8), con i risultati sperimentali e con quelli degli autori usati come confronto per il presente lavoro.

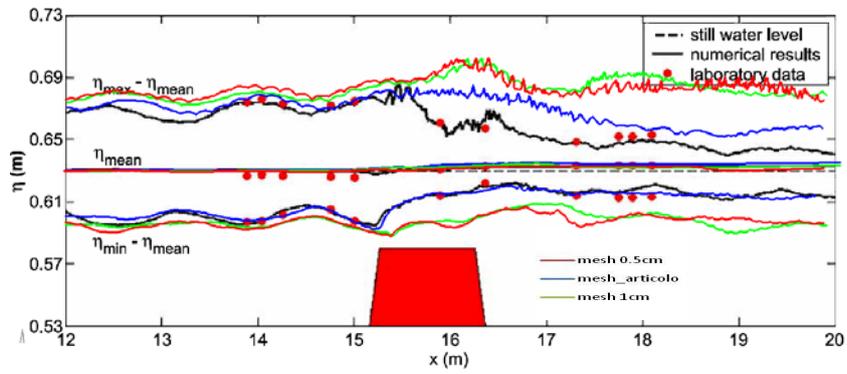


Figura 3.8 Andamento del Set-Up (blu mesh_articolo; rosso mesh 0.5x0.5cm; verde mesh 1x1cm)

3.4 SPETTRI

In fase di calibrazione si sono valutati anche gli spettri nelle stesse ascisse di cui sono stati presentati gli andamenti delle E_t in precedenza. Dal confronto con i grafici presentati dagli autori (cfr. Figura 3.10) si evince come anche in questo caso ci sia un trasferimento di energia dall'armonica fondamentale a quelle a frequenza multipla (cfr. Figura 3.11), ciò in accordo con quanto discusso e ricavato in Ciardulli (2009). Nel suo lavoro viene postulata l'esistenza, nella zona protetta della spiaggia, di componenti super-armoniche sia libere che legate in fase (di frequenza multipla della dominante), che vengono ricercate analiticamente analizzando i segnali registrati di sopraelevazione del pelo libero. Tale assunto deriva dal considerare gli studi teorici di Massel (1986) e Goda et al. (1999) che mostrano come la risposta idraulica di una barriera impermeabile soggetta ad una sollecitazione periodica (nell'ipotesi di fluido perfetto e in assenza di frangimento) comprenda un insieme di armoniche di frequenze multiple di quella dominante che rimane, sostanzialmente, coincidente con quella fondamentale del moto ondoso incidente. Successivamente gli studi sperimentali di Grue (1992) e Brossard e Chagdali (2001) hanno mostrato come la generazione di super-armoniche libere avvenga anche in presenza di frangimento e con barriere porose (Losada et al. 1997).

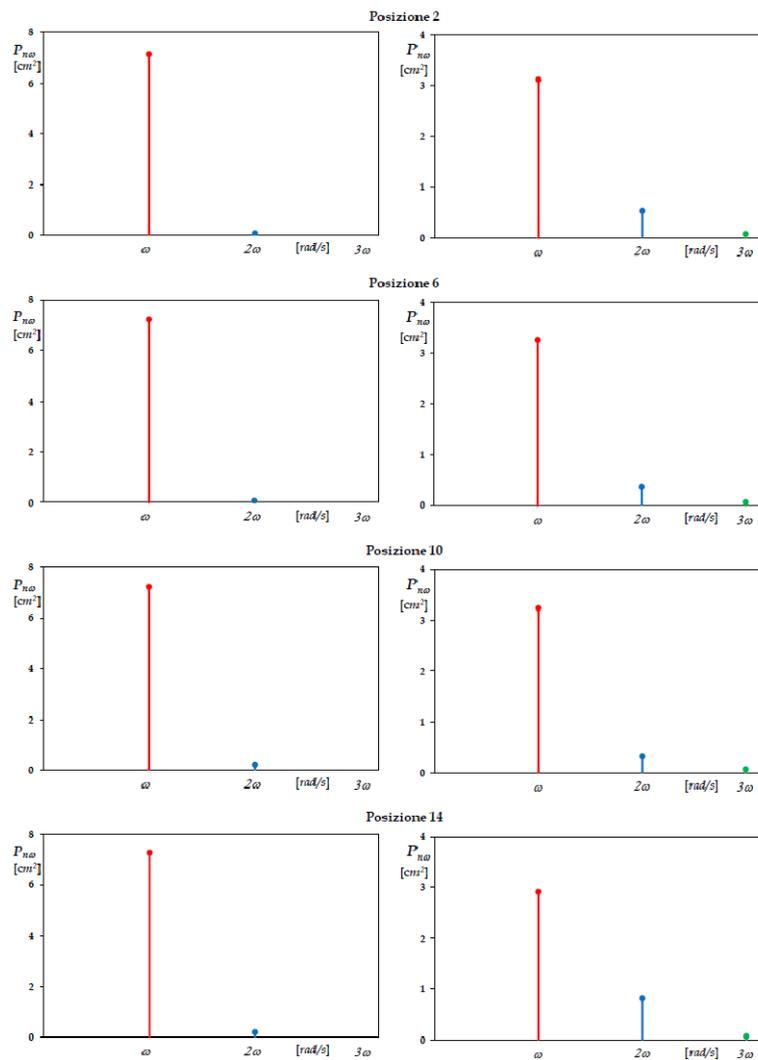


Figura 3.9 Evoluzione dello spettro di potenza nell'area protetta in assenza (sinistra) ed in presenza (destra) di una struttura sommersa (Ciardulli 2009)

Anche in questa analisi numerica come in quella effettuata col COBRAS da Garcia et al. si nota come al gauge 6 ci sia un abbattimento dell'ampiezza della prima armonica dovuto all'insorgere del frangimento sopra la barriera (cfr. Figura 3.12), con un iniziale incremento delle ampiezze delle armoniche successive. Seguendo l'andamento delle ampiezze delle fondamentali si evince un abbassamento in

corrispondenza dei gauge 3 e 4 con un successivo incremento al gauge 5 dovuto all'effetto di shoaling (inizio della barriera).

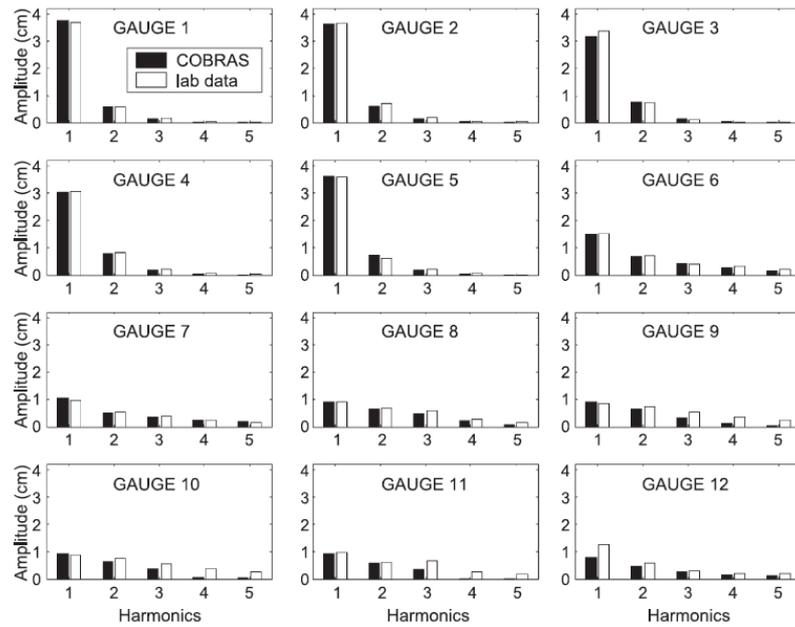
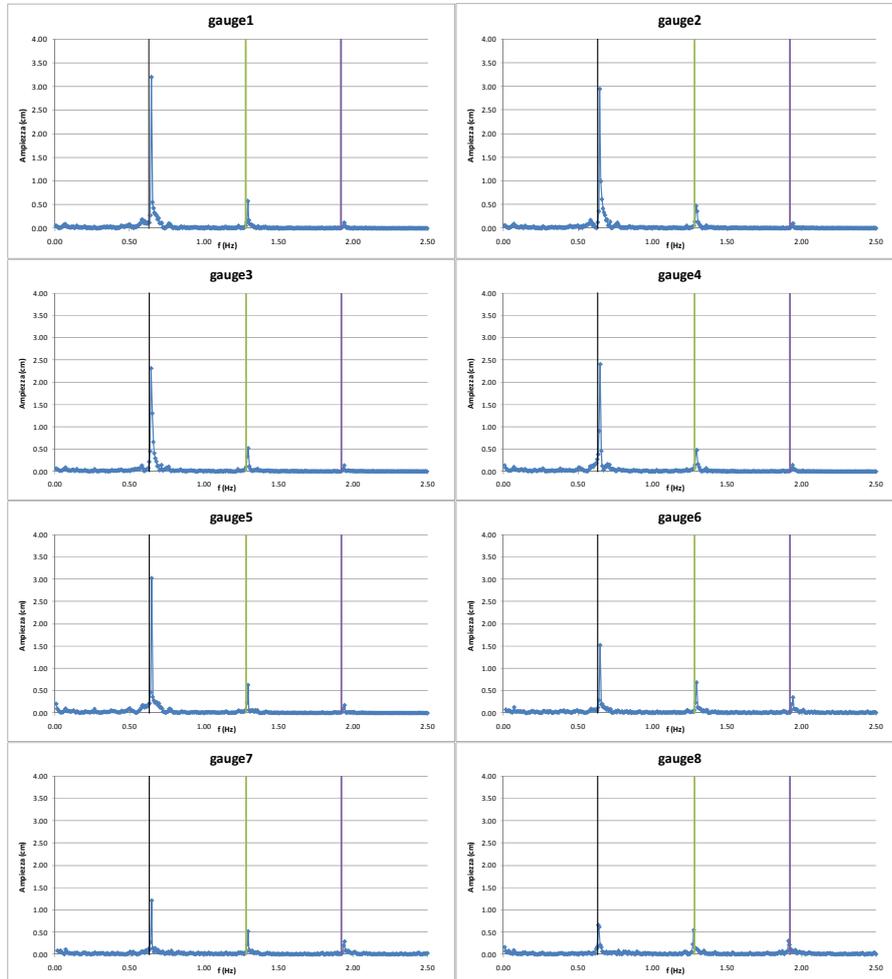


Figura 3.10 Ampiezza delle armoniche, gauges 1-12, $h=40\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$, $H=7\text{cm}$ (Garcia et al. 2004)



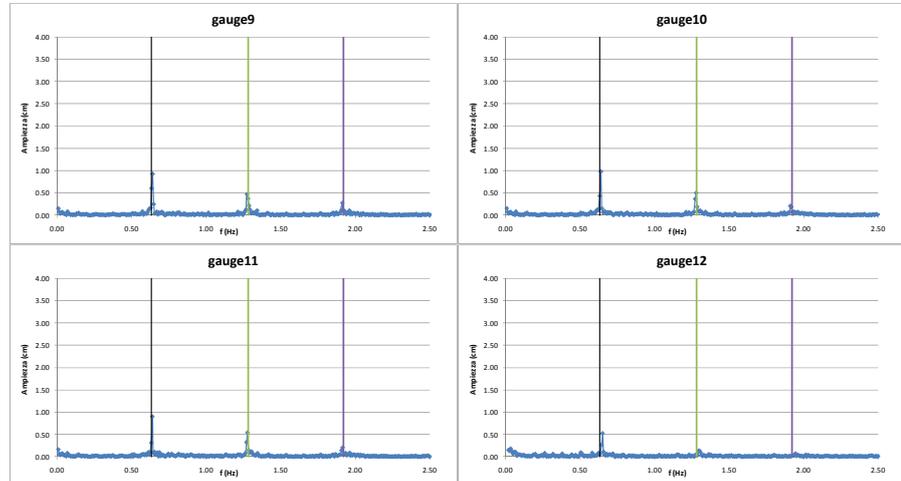


Figura 3.11 Ampiezza delle armoniche, gauges 1-12, $h=40\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$, $H=7\text{cm}$ (FLOW-3D) (nero freq. fondamentale, verde 2°armonica, viola 3°armonica).

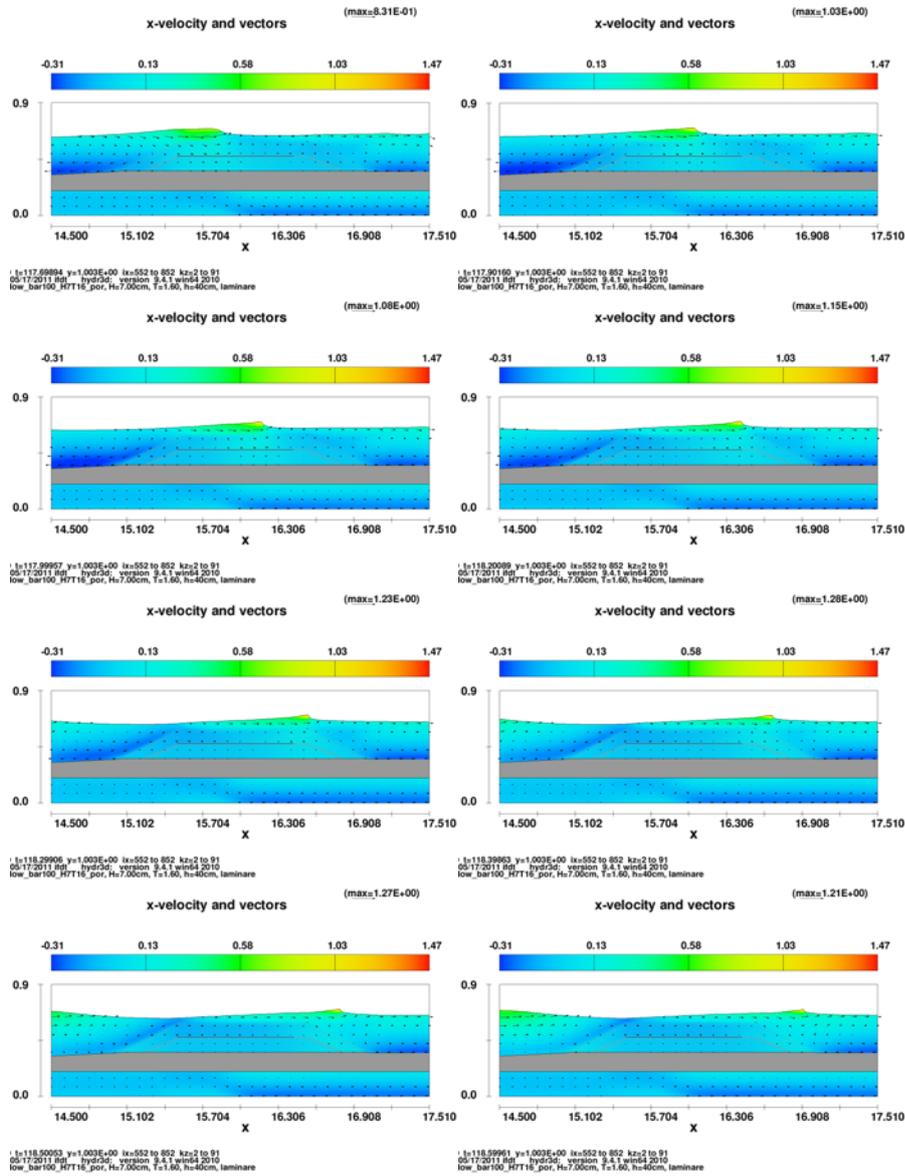


Figura 3.12 Andamento della velocità orizzontali per la simulazione di calibrazione

3.5 ANALISI DELLA RIFLESSIONE

A partire dall'analisi spettrale dei segnali ottenuti dalla modellazione numerica è stato possibile valutare la riflessione del moto ondoso indotta dalla barriera. Il coefficiente di riflessione K_r , definito come rapporto tra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente $K_r = \frac{H_r}{H_i}$, è stato calcolato come

$$K_r = \sqrt{\frac{m_{or}}{m_{oi}}}$$
, con $m_0 = \int_{f=0}^{\infty} S(f)df$, momento spettrale nullo nel caso di segnale continuo, qui invece calcolato nel discreto avendo a disposizione lo spettro S nelle componenti a_i per un numero finito di frequenze f_i , $m_0 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} a_i^2\right) \Delta f_i$.

Per ogni simulazione è stato valutato il K_r per le sonde precedenti la barriera e a tergo di essa (vedi Figura 3.13). In questa analisi le sonde accoppiate precedenti la barriera sono state poste ad una distanza da questa pari almeno ad una volta la lunghezza d'onda simulata, mentre quelle a tergo in una posizione tale da evitare gli effetti conseguenti il frangimento dell'onda sulla struttura.

Prima del calcolo della riflessione e trasmissione è stata condotta un'attenta analisi di sensibilità dei risultati al variare della distanza tra le sonde accoppiate al largo. I risultati ottenuti non sono riportati per brevità mentre la descrizione della procedura, insieme ai risultati per un altro caso analizzato, è riportata nel paragrafo 5.3.1.

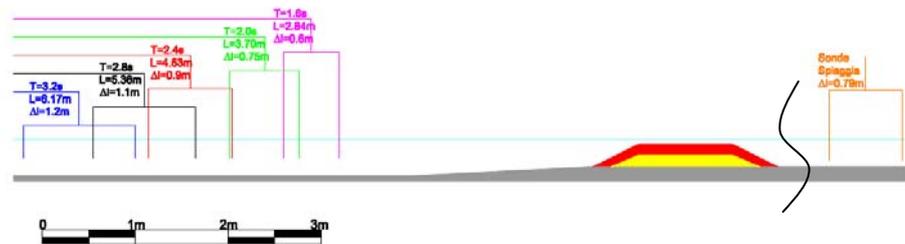


Figura 3.13 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione

Si riportano in Tabella 3.4 ed in Tabella 3.5 i risultati ottenuti per la barriera con $B=25\text{cm}$ e $B=100\text{cm}$.

Tabella 3.4 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia ($B=25\text{cm}$)

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | K_{r1} | H_{s_i} (cm) | H_{s_r} (cm) | K_{r2} | H_{s_i} (cm) | H_{s_r} (cm) | |
|------------|----------------------------|---------------------------|----------|----------------|----------------|----------|-----------------|----------------|--|
| | | | | largo | | | spiaggia | | |
| H37T16_B25 | 3.70 | 1.60 | 0.144 | 4.06 | 0.58 | 0.116 | 2.84 | 0.33 | |
| H37T20_B25 | 3.70 | 2.00 | 0.233 | 2.31 | 0.54 | 0.152 | 2.27 | 0.35 | |
| H37T24_B25 | 3.70 | 2.40 | 0.394 | 3.68 | 1.45 | 0.084 | 4.22 | 0.35 | |
| H37T28_B25 | 3.70 | 2.80 | 0.448 | 4.57 | 2.05 | 0.147 | 2.96 | 0.44 | |
| H37T32_B25 | 3.70 | 3.20 | 0.423 | 6.62 | 2.80 | 0.214 | 4.39 | 0.94 | |
| H70T16_B25 | 7.00 | 1.60 | 0.135 | 6.95 | 0.94 | 0.182 | 4.83 | 0.88 | |
| H70T20_B25 | 7.00 | 2.00 | 0.235 | 4.18 | 0.98 | 0.161 | 5.00 | 0.80 | |
| H70T24_B25 | 7.00 | 2.40 | 0.454 | 7.00 | 3.18 | 0.076 | 6.41 | 0.49 | |
| H70T28_B25 | 7.00 | 2.80 | 0.492 | 8.43 | 4.15 | 0.218 | 5.93 | 1.29 | |
| H70T32_B25 | 7.00 | 3.20 | 0.375 | 11.49 | 4.31 | 0.24 | 8.75 | 2.10 | |
| H10T16_B25 | 10.00 | 1.60 | 0.123 | 8.99 | 1.11 | 0.266 | 6.09 | 1.62 | |
| H10T20_B25 | 10.00 | 2.00 | 0.255 | 5.79 | 1.48 | 0.179 | 6.66 | 1.19 | |
| H10T24_B25 | 10.00 | 2.40 | 0.503 | 9.32 | 4.69 | 0.087 | 7.66 | 0.67 | |
| H10T28_B25 | 10.00 | 2.80 | 0.512 | 11.41 | 5.84 | 0.306 | 8.70 | 2.66 | |
| H10T32_B25 | 10.00 | 3.20 | 0.341 | 11.85 | 4.04 | 0.269 | 8.00 | 2.15 | |

Tabella 3.5 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia ($B=100\text{cm}$)

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | K_{r1} | H_s (cm) | | K_{r2} | H_s (cm) | |
|-------------|----------------------------|---------------------------|----------|------------|----------------|----------|------------|----------------|
| | | | | largo | H_{s_r} (cm) | | spiaggia | H_{s_r} (cm) |
| H37T16_B100 | 3.70 | 1.60 | 0.117 | 3.90 | 0.50 | 0.136 | 1.84 | 0.25 |
| H37T20_B100 | 3.70 | 2.00 | 0.222 | 3.49 | 0.54 | 0.244 | 1.52 | 0.37 |
| H37T24_B100 | 3.70 | 2.40 | 0.267 | 3.60 | 1.00 | 0.176 | 2.54 | 0.45 |
| H37T28_B100 | 3.70 | 2.80 | 0.306 | 4.39 | 1.34 | 0.17 | 1.97 | 0.34 |
| H37T32_B100 | 3.70 | 3.20 | 0.278 | 4.80 | 1.30 | 0.109 | 2.60 | 0.29 |
| H70T16_B100 | 7.00 | 1.60 | 0.099 | 6.70 | 0.70 | 0.359 | 3.31 | 1.19 |
| H70T20_B100 | 7.00 | 2.00 | 0.25 | 4.28 | 1.07 | 0.186 | 3.02 | 0.56 |
| H70T24_B100 | 7.00 | 2.40 | 0.344 | 6.83 | 2.35 | 0.134 | 5.26 | 0.70 |
| H70T28_B100 | 7.00 | 2.80 | 0.35 | 8.56 | 3.00 | 0.276 | 5.86 | 1.62 |
| H70T32_B100 | 7.00 | 3.20 | 0.296 | 9.40 | 2.80 | 0.247 | 5.45 | 1.35 |
| H10T16_B100 | 10.00 | 1.60 | 0.087 | 8.60 | 0.80 | 0.318 | 4.12 | 1.31 |
| H10T20_B100 | 10.00 | 2.00 | 0.226 | 6.38 | 1.44 | 0.176 | 4.80 | 0.85 |
| H10T24_B100 | 10.00 | 2.40 | 0.386 | 9.41 | 3.64 | 0.183 | 7.13 | 1.31 |
| H10T28_B100 | 10.00 | 2.8 | 0.379 | 11.84 | 4.49 | 0.298 | 5.63 | 1.68 |
| H10T32_B100 | 10.00 | 3.2 | 0.307 | 11.68 | 3.59 | 0.275 | 6.06 | 1.67 |

I risultati per le sonde di largo e di spiaggia sono riportati nelle figure seguenti in funzione dell'altezza d'onda incidente e del periodo simulato. Non sembra esserci una tendenza particolare per i risultati sia raggruppati per stessa larghezza di sommità della barriera sia che guardati nell'insieme. L'unica tendenza ravvisabile è un aumento del valore del coefficiente di riflessione della barriera (misurato alle sonde al largo) all'aumentare del periodo fino ad un certo valore, dopo il quale questa tendenza sembra invertirsi.

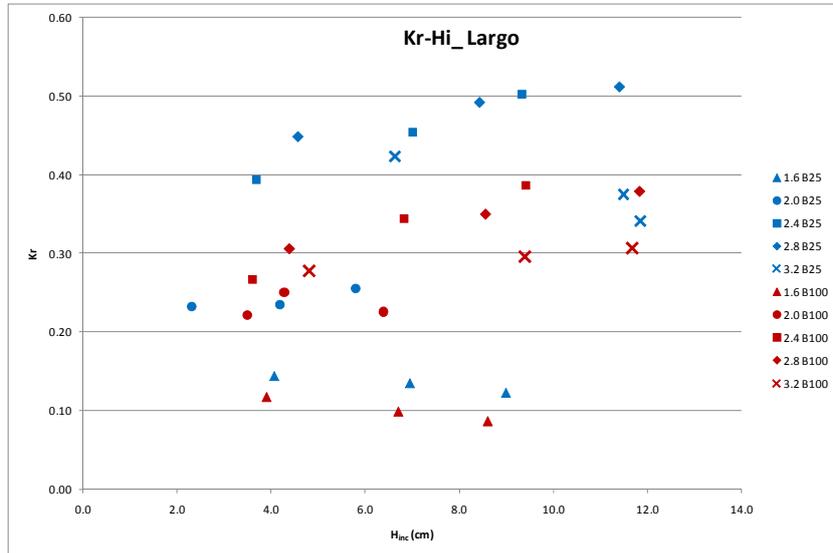


Figura 3.14 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di H_{inc} (in blu $B=25$ cm, in rosso $B=100$ cm), sonde al largo (riflessione della barriera)

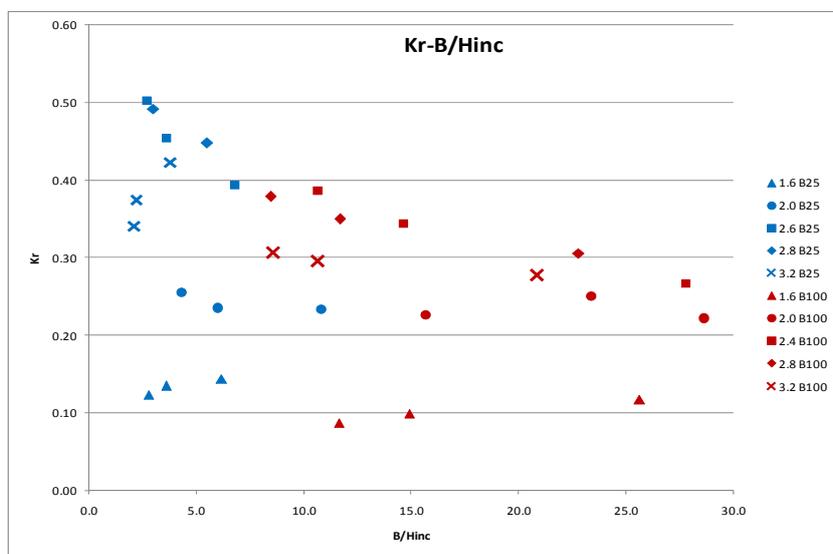


Figura 3.15 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di B/H_{inc} (in blu $B=25$ cm, in rosso $B=100$ cm), sonde al largo (riflessione della barriera)

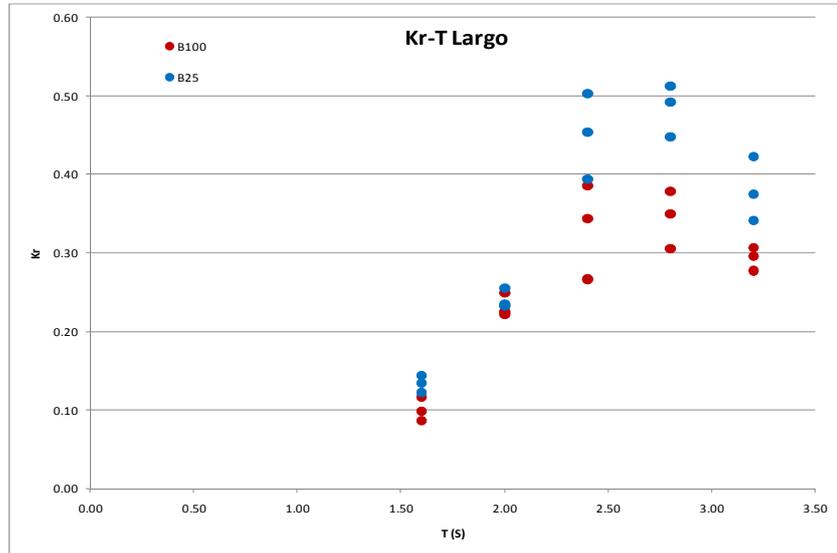


Figura 3.16 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di T (in blu $B=25$ cm, in rosso $B=100$ cm), sonde al largo (riflessione della barriera)

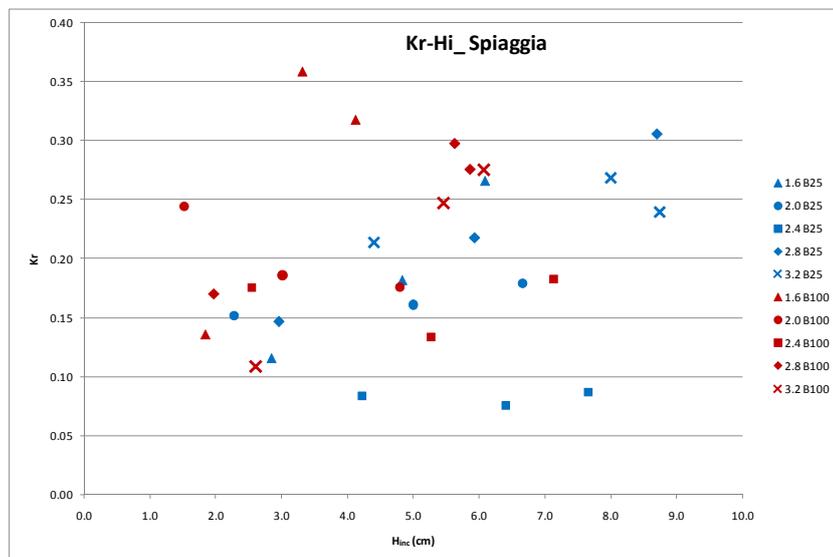


Figura 3.17 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di H_{inc} (in blu $B=25$ cm, in rosso $B=100$ cm), sonde lato spiaggia

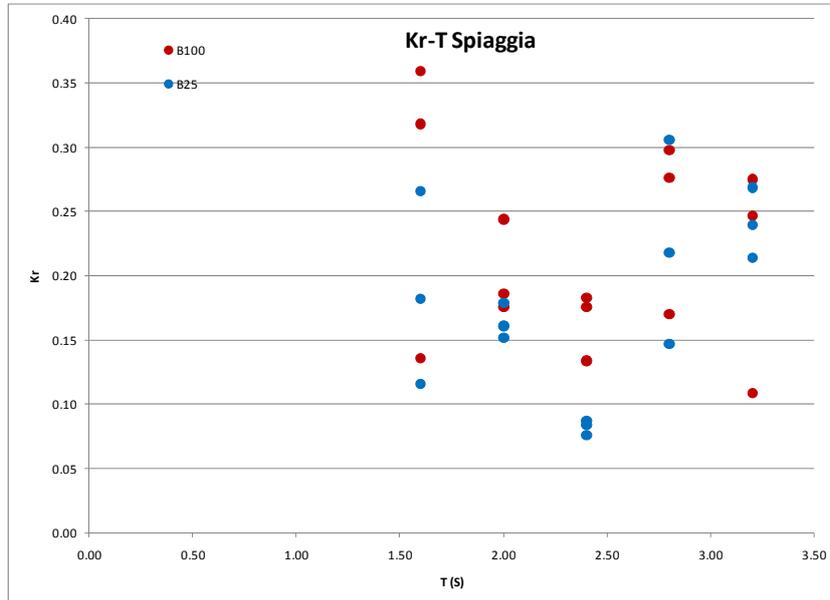


Figura 3.18 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati al variare di T (in blu $B=25\text{cm}$, in rosso $B=100\text{cm}$), sonde lato spiaggia

3.5.1 Confronto con formule di letteratura (riflessione)

I coefficienti di riflessione misurati con la modellazione numerica, alle sonde precedenti la barriera, sono stati anche confrontati con i valori ottenibili da formule di letteratura, alcune delle quali ampiamente usate nella corrente pratica progettuale. A partire dallo studio di Calabrese et al. (2005), dove è presentata un'ampia descrizione delle formule per valutare la riflessione di barriere sommerse, sono state selezionate quelle che potevano essere applicate al caso specifico. Alcune delle formule esistenti per il calcolo del coefficiente di riflessione sono valide per strutture emergenti non trascinabili e quindi inadeguate per le barriere sommerse ma comunque il confronto dei dati numerici con i risultati di queste formule può essere di aiuto per verificare l'applicabilità delle relazioni o un eventuale adattamento a situazioni come quella qui analizzata. Nel caso di strutture emergenti, l'energia dell'onda riflessa è quella potenziale che compete al fluido che risale lungo il paramento esterno (fenomeno del run-up) a meno di dissipazioni.

Il coefficiente di riflessione, per questa ragione, è espresso spesso in funzione del numero di Iribarren $\xi = \frac{\tan \alpha_{off}}{\sqrt{\frac{2\pi H_i}{g T_i^2}}}$.

Seelig (1983) deriva una relazione per il K_r da test con onde regolari, valida per paramenti lisci ed impermeabili:

$$K_r = \frac{\xi^2}{(5.5 + \xi^2)}$$

Postma (1988) ha ricavato una relazione per paramenti in massi naturali e attacchi ondosi irregolari:

$$K_r = 0.14 \cdot \xi_p^{0.73},$$

con ξ_p numero di Iribarren calcolato con il periodo di picco.

Successivamente sempre Postma (1989) ha proposto una relazione calibrata sui dati di Van der Meer (1988):

$$K_r = 0.071 \cdot P_n^{-0.081} \cdot \cot \alpha^{-0.62} \cdot s_p^{-0.46},$$

$$\text{con } s_p = \frac{2\pi H_{si}}{g T_{pi}^2}$$

Per l'utilizzo di questa relazione in questa analisi il valore di P_n è stato posto pari a 0.6, indicato dall'autore per strutture omogenee.

Dall'analisi dei dati ricavati con queste relazioni Van der Meer et al. (2005) hanno proposto l'introduzione di un coefficiente correttivo ipotizzando che il K_r cresca in maniera lineare con la quota di cresta adimensionalizzata $\frac{R_c}{H_{si}}$ e quindi:

$$K_r = K_{rP} \left(0.2 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.9 \right) \text{ per } \frac{R_c}{H_{si}} < 0.5,$$

$$K_r = K_{rP} \text{ per } \frac{R_c}{H_{si}} \geq 0.5.$$

Un'altra correzione apportata alla relazione di Postma è quella di Zanuttigh e Lamberti (2004) che si basa sul rapporto tra la celerità dell'onda trasmessa e incidente:

$$K_r = \frac{1-n}{1+n} K_{rPostma},$$

con $n = \frac{c_t}{c_i}$, $c_t = Re(\sqrt{g(H_{Si} - R_c)})$ (parte reale della radice).

Tabella 3.6 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura ($B=25\text{cm}$)

| | T (s) | kd | H_{si} (cm) | H_{sr} (cm) | R_c/H_{si} | Num. di Iribarren | K_r (simulato) | Seelig (1983) | Postma (1988) | Postma (1989) (dati Van der Meer) | Postma (cor. Zanuttigh- Lamberti 2004) | Postma (cor. Van Der Meer 2005) |
|------------|-----------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|---|---|
| H37T16_B25 | 1.60 | 0.89 | 4.06 | 0.58 | -1.23 | 5.06 | 0.14 | 0.85 | 0.46 | 0.41 | 0.08 | 0.30 |
| H37T20_B25 | 2.00 | 0.68 | 2.31 | 0.54 | -2.16 | 8.37 | 0.23 | 0.94 | 0.66 | 0.65 | 0.21 | 0.31 |
| H37T24_B25 | 2.40 | 0.55 | 3.68 | 1.45 | -1.36 | 7.97 | 0.39 | 0.93 | 0.64 | 0.62 | 0.24 | 0.40 |
| H37T28_B25 | 2.80 | 0.47 | 4.57 | 2.05 | -1.10 | 8.34 | 0.45 | 0.94 | 0.66 | 0.65 | 0.28 | 0.45 |
| H37T32_B25 | 3.20 | 0.41 | 6.62 | 2.80 | -0.76 | 7.92 | 0.42 | 0.93 | 0.63 | 0.62 | 0.29 | 0.47 |
| H70T16_B25 | 1.60 | 0.89 | 6.95 | 0.94 | -0.72 | 3.87 | 0.14 | 0.77 | 0.38 | 0.32 | 0.05 | 0.28 |
| H70T20_B25 | 2.00 | 0.68 | 4.18 | 0.98 | -1.20 | 6.23 | 0.24 | 0.90 | 0.53 | 0.49 | 0.15 | 0.35 |
| H70T24_B25 | 2.40 | 0.55 | 7.00 | 3.18 | -0.71 | 5.78 | 0.45 | 0.88 | 0.50 | 0.46 | 0.16 | 0.38 |
| H70T28_B25 | 2.80 | 0.47 | 8.43 | 4.15 | -0.59 | 6.14 | 0.49 | 0.89 | 0.53 | 0.49 | 0.20 | 0.41 |
| H70T32_B25 | 3.20 | 0.41 | 11.49 | 4.31 | -0.44 | 6.01 | 0.38 | 0.89 | 0.52 | 0.48 | 0.20 | 0.42 |
| H10T16_B25 | 1.60 | 0.89 | 8.99 | 1.11 | -0.56 | 3.40 | 0.12 | 0.72 | 0.34 | 0.28 | 0.04 | 0.27 |
| H10T20_B25 | 2.00 | 0.68 | 5.79 | 1.48 | -0.86 | 5.29 | 0.26 | 0.86 | 0.47 | 0.43 | 0.12 | 0.34 |
| H10T24_B25 | 2.40 | 0.55 | 9.32 | 4.69 | -0.54 | 5.00 | 0.50 | 0.85 | 0.45 | 0.40 | 0.13 | 0.36 |
| H10T28_B25 | 2.80 | 0.47 | 11.41 | 5.84 | -0.44 | 5.28 | 0.51 | 0.86 | 0.47 | 0.42 | 0.16 | 0.38 |
| H10T32_B25 | 3.20 | 0.41 | 11.85 | 4.04 | -0.42 | 5.92 | 0.34 | 0.89 | 0.51 | 0.47 | 0.20 | 0.42 |

Tabella 3.7 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del Kr simulati e calcolati con formule di letteratura (B=100cm)

| | T (s) | kd | Hsi (cm) | Hsr (cm) | Rc/Hsi | Num. di Iribarren | Kr (simulato) | Seelig (1983) | Postma (1988) | Postma (1989) (dati Van der Meer) | Postma (cor. Zanuttigh- Lamberti 2004) | Postma (cor. Van Der Meer 2005) |
|-------------|----------|------|-------------|-------------|--------|----------------------|------------------|------------------|------------------|--|--|--|
| H37T16_B100 | 1.60 | 0.89 | 3.90 | 0.50 | -1.28 | 5.16 | 0.12 | 0.85 | 0.46 | 0.42 | 0.09 | 0.30 |
| H37T20_B100 | 2.00 | 0.68 | 3.49 | 0.54 | -1.43 | 6.81 | 0.22 | 0.91 | 0.57 | 0.54 | 0.17 | 0.35 |
| H37T24_B100 | 2.40 | 0.55 | 3.60 | 1.00 | -1.39 | 8.05 | 0.27 | 0.93 | 0.64 | 0.63 | 0.24 | 0.40 |
| H37T28_B100 | 2.80 | 0.47 | 4.39 | 1.34 | -1.14 | 8.51 | 0.31 | 0.94 | 0.67 | 0.66 | 0.29 | 0.45 |
| H37T32_B100 | 3.20 | 0.41 | 4.80 | 1.30 | -1.04 | 9.30 | 0.28 | 0.95 | 0.71 | 0.72 | 0.34 | 0.49 |
| H70T16_B100 | 1.60 | 0.89 | 6.70 | 0.70 | -0.75 | 3.94 | 0.10 | 0.77 | 0.38 | 0.32 | 0.05 | 0.29 |
| H70T20_B100 | 2.00 | 0.68 | 4.28 | 1.07 | -1.17 | 6.16 | 0.25 | 0.89 | 0.53 | 0.49 | 0.15 | 0.35 |
| H70T24_B100 | 2.40 | 0.55 | 6.83 | 2.35 | -0.73 | 5.85 | 0.34 | 0.88 | 0.51 | 0.47 | 0.17 | 0.38 |
| H70T28_B100 | 2.80 | 0.47 | 8.56 | 3.00 | -0.58 | 6.09 | 0.35 | 0.89 | 0.52 | 0.48 | 0.19 | 0.41 |
| H70T32_B100 | 3.20 | 0.41 | 9.40 | 2.80 | -0.53 | 6.65 | 0.30 | 0.91 | 0.56 | 0.53 | 0.23 | 0.44 |
| H10T16_B100 | 1.60 | 0.89 | 8.60 | 0.80 | -0.58 | 3.47 | 0.09 | 0.73 | 0.35 | 0.29 | 0.04 | 0.27 |
| H10T20_B100 | 2.00 | 0.68 | 6.38 | 1.44 | -0.78 | 5.04 | 0.23 | 0.85 | 0.46 | 0.41 | 0.11 | 0.34 |
| H10T24_B100 | 2.40 | 0.55 | 9.41 | 3.64 | -0.53 | 4.98 | 0.39 | 0.85 | 0.45 | 0.40 | 0.13 | 0.36 |
| H10T28_B100 | 2.80 | 0.47 | 11.84 | 4.49 | -0.42 | 5.18 | 0.38 | 0.86 | 0.47 | 0.42 | 0.15 | 0.38 |
| H10T32_B100 | 3.20 | 0.41 | 11.68 | 3.59 | -0.43 | 5.96 | 0.31 | 0.89 | 0.52 | 0.48 | 0.20 | 0.42 |

Considerando i dati complessivamente (per B=25cm e B=100cm) si evince da questa analisi come le formule di Seelig 1983, Postma 1988 e Postma 1989 sovrastimino i valori dei K_r ; la correzione alla formula di Postma di Zanuttigh e Lamberti del 2004 sembra sottostimare la riflessione nella quasi totalità dei casi. L'ultima relazione, quella di Postma corretto da Van der Meer 2005 fornisce risultati più vicini a quelli ricavati numericamente per entrambe le larghezze della berma. Tale conclusione si può ricavare anche dal grafico che riporta i valori di RMSE (Root mean squared error) calcolato per le formule utilizzate per il confronto con la seguente relazione

$$RMSE = \left[\frac{\sum_n (K_{r,f} - K_{r,m})^2}{N} \right]^{0.5},$$

dove $K_{r,f}$ e $K_{r,m}$ sono, rispettivamente, i valori dei coefficienti calcolati con l'applicazione della formula e misurati per una stessa condizione di moto onduoso incidente.

Tabella 3.8 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_r (B=25cm e B=100cm)

| Seelig (1983) | Postma (1988) | Postma (1989, dati Van der Meer) | Postma (corretto da Zanuttigh-Lamberti 2004) | Postma (corretto da Van Der Meer 2005) |
|---------------|---------------|----------------------------------|--|--|
| 0.85 | 0.37 | 0.33 | 0.24 | 0.17 |

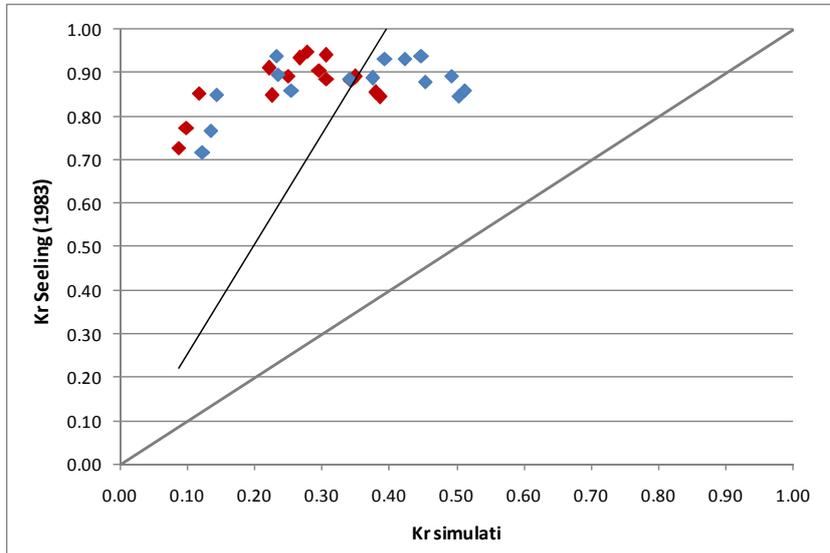


Figura 3.19 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)

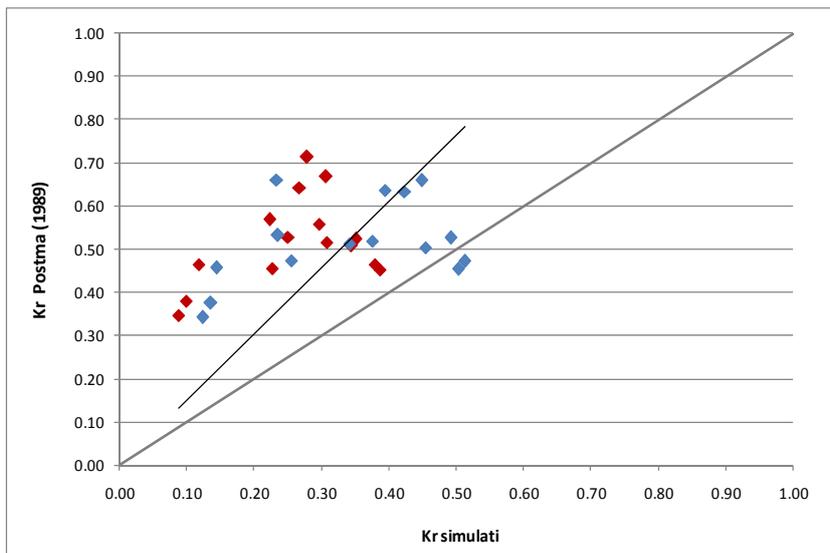


Figura 3.20 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)

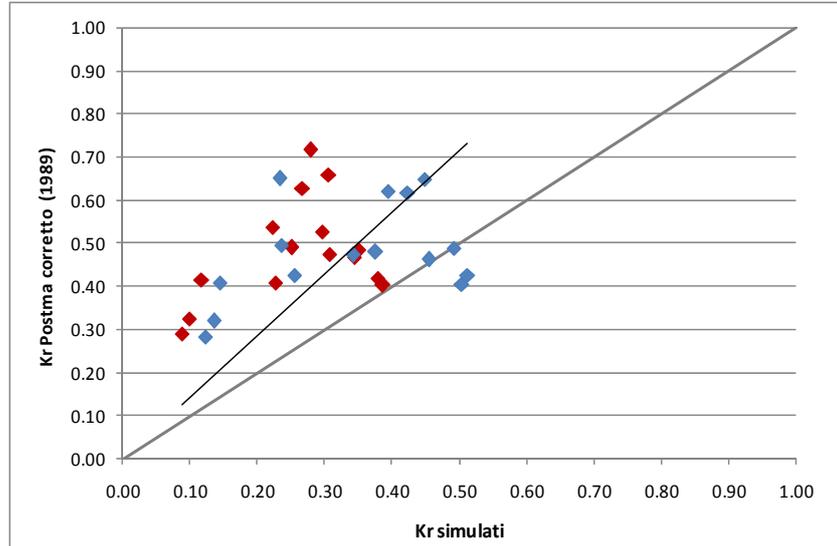


Figura 3.21 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta (1989) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)

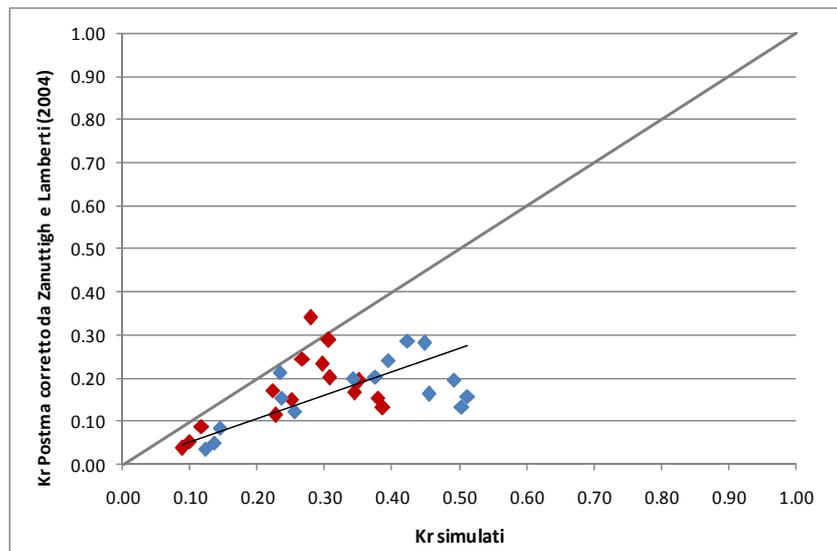


Figura 3.22 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Zanuttigh et al. (2004) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)

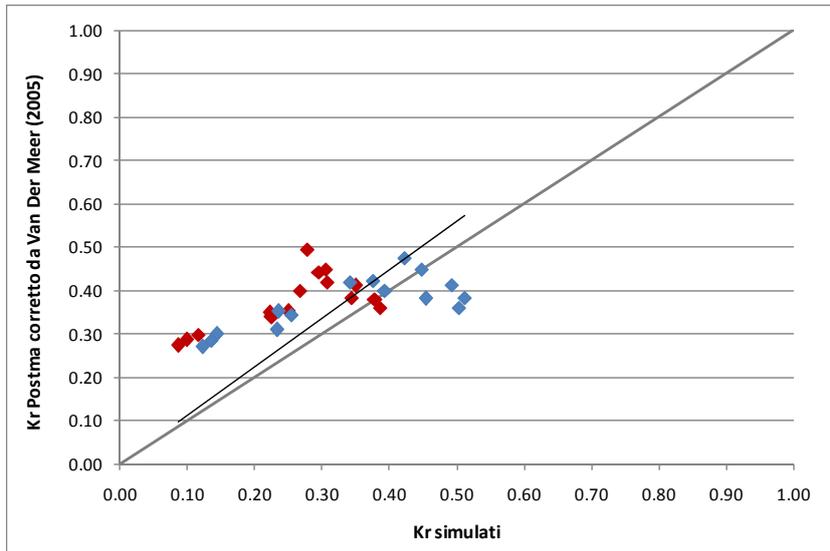


Figura 3.23 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Van der Meer (2005) (blu_B=25cm e rosso_B=100cm)

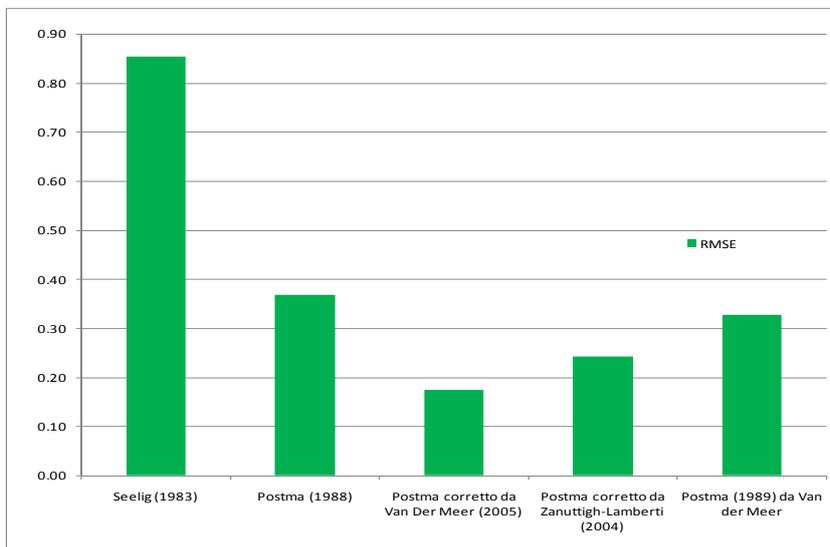


Figura 3.24 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_r (B=25cm e B=100cm)

3.6 ANALISI DELLA TRASMISSIONE

L'analisi della trasmissione del modo ondoso a tergo della barriera è stata effettuata mediante il calcolo dei coefficienti di trasmissione a partire dagli spettri rilevati nelle ascisse poste prima e dopo la barriera, stesse posizioni usate per il calcolo della riflessione (vedi schema paragrafo 3.5) Il K_t , definito come rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa e quella incidente $K_t = \frac{H_t}{H_i} = \sqrt{\frac{m_{0t}}{m_{0i}}}$, con m_0 calcolato come nel caso della riflessione. m_{0i} è lo stesso considerato per l'analisi della riflessione, quindi valutato a partire dalla componente incidente alla barriera misurata alle sonde poste a largo; m_{0t} non è altro che la componente incidente alla spiaggia misurata alle sonde poste a tergo della barriera. I risultati dei K_t ottenuti sono riportati nella tabella seguente insieme ad alcuni parametri caratteristici utili per effettuare un confronto.

Tabella 3.9 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_t simulati (B=25cm)

| | T_{in} (s) | d/L | kd | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | B/L | B/ H_{si} | Num. Iribarren | Rc/ H_{si} | K_t |
|------------|-----------------|------|------|------------------|------------------|------|-------------|-------------------|-----------------|-------------|
| H37T16_B25 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 4.06 | 2.72 | 0.09 | 6.16 | 5.06 | -1.23 | 0.67 |
| H37T20_B25 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 2.31 | 1.63 | 0.07 | 10.80 | 8.37 | -2.16 | 0.71 |
| H37T24_B25 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 3.68 | 2.43 | 0.06 | 6.80 | 7.97 | -1.36 | 0.66 |
| H37T28_B25 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 4.57 | 3.43 | 0.05 | 5.48 | 8.34 | -1.10 | 0.85 |
| H37T32_B25 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 6.62 | 5.20 | 0.04 | 3.78 | 7.92 | -0.76 | 0.79 |
| H70T16_B25 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 6.95 | 4.58 | 0.09 | 3.60 | 3.87 | -0.72 | 0.66 |
| H70T20_B25 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 4.18 | 2.78 | 0.07 | 5.98 | 6.23 | -1.20 | 0.67 |
| H70T24_B25 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 7.00 | 4.78 | 0.06 | 3.57 | 5.78 | -0.71 | 0.68 |
| H70T28_B25 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 8.43 | 7.64 | 0.05 | 2.96 | 6.14 | -0.59 | 0.91 |
| H70T32_B25 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 11.49 | 8.40 | 0.04 | 2.18 | 6.01 | -0.44 | 0.73 |
| H10T16_B25 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 8.99 | 5.20 | 0.09 | 2.78 | 3.40 | -0.56 | 0.58 |
| H10T20_B25 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 5.79 | 3.45 | 0.07 | 4.32 | 5.29 | -0.86 | 0.60 |
| H10T24_B25 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 9.32 | 6.72 | 0.06 | 2.68 | 5.00 | -0.54 | 0.72 |
| H10T28_B25 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 11.41 | 10.61 | 0.05 | 2.19 | 5.28 | -0.44 | 0.93 |
| H10T32_B25 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 11.85 | 8.24 | 0.04 | 2.11 | 5.92 | -0.42 | 0.70 |

Tabella 3.10 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_t simulati ($B=100\text{cm}$)

| | T_{in} (s) | d/L | kd | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | B/L | B/ H_{si} | Num. Iribarren | Rc/ H_{si} | K_t |
|-------------|-----------------|------|------|------------------|------------------|------|-------------|-------------------|-----------------|-------------|
| H37T16_B100 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 3.90 | 1.48 | 0.35 | 25.64 | 5.16 | -1.28 | 0.38 |
| H37T20_B100 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 3.49 | 1.41 | 0.27 | 28.64 | 6.81 | -1.43 | 0.40 |
| H37T24_B100 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 3.60 | 1.56 | 0.22 | 27.78 | 8.05 | -1.39 | 0.43 |
| H37T28_B100 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 4.39 | 2.54 | 0.19 | 22.79 | 8.51 | -1.14 | 0.58 |
| H37T32_B100 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 4.80 | 2.78 | 0.16 | 20.83 | 9.30 | -1.04 | 0.58 |
| H70T16_B100 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 6.70 | 2.51 | 0.35 | 14.93 | 3.94 | -0.75 | 0.37 |
| H70T20_B100 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 4.28 | 1.57 | 0.27 | 23.39 | 6.16 | -1.17 | 0.37 |
| H70T24_B100 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 6.83 | 3.08 | 0.22 | 14.65 | 5.85 | -0.73 | 0.45 |
| H70T28_B100 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 8.56 | 5.54 | 0.19 | 11.68 | 6.09 | -0.58 | 0.65 |
| H70T32_B100 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 9.40 | 5.04 | 0.16 | 10.64 | 6.65 | -0.53 | 0.54 |
| H10T16_B100 | 1.60 | 0.14 | 0.89 | 8.60 | 2.82 | 0.35 | 11.63 | 3.47 | -0.58 | 0.33 |
| H10T20_B100 | 2.00 | 0.11 | 0.68 | 6.38 | 2.03 | 0.27 | 15.67 | 5.04 | -0.78 | 0.32 |
| H10T24_B100 | 2.40 | 0.09 | 0.55 | 9.41 | 4.44 | 0.22 | 10.62 | 4.98 | -0.53 | 0.47 |
| H10T28_B100 | 2.80 | 0.07 | 0.47 | 11.84 | 7.32 | 0.19 | 8.45 | 5.18 | -0.42 | 0.62 |
| H10T32_B100 | 3.20 | 0.06 | 0.41 | 11.68 | 6.18 | 0.16 | 8.56 | 5.96 | -0.43 | 0.53 |

Nei grafici che seguono i K_t simulati sono riportati in funzione del periodo T , del rapporto tra la larghezza in sommità della barriera (B) e la lunghezza d'onda L , del rapporto tra la B e l'altezza incidente H_{inc} . Dal primo grafico, confronto con il periodo del moto ondoso T , si nota una leggera tendenza dei valori di K_t ad aumentare con il diminuire del periodo dell'onda incidente. All'aumentare del rapporto B/L e di B/H_{inc} invece i coefficienti di trasmissione tendono a diminuire.

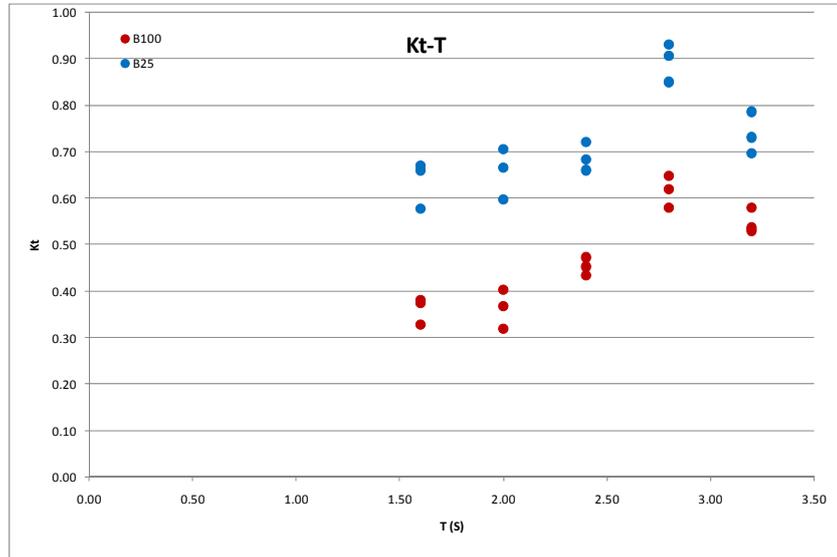


Figura 3.25 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di T (blu $B=25$ cm, rosso $B=100$ cm)

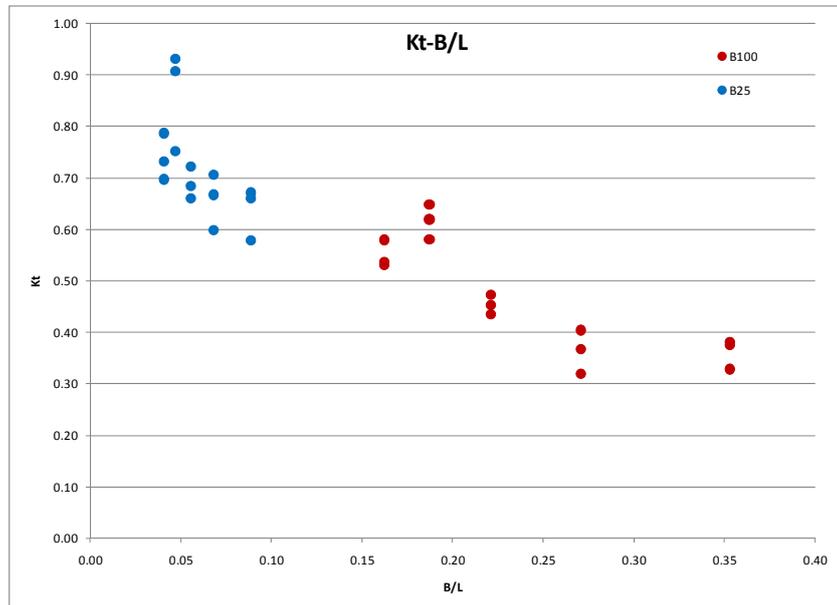


Figura 3.26 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di B/L (blu $B=25$ cm, rosso $B=100$ cm)

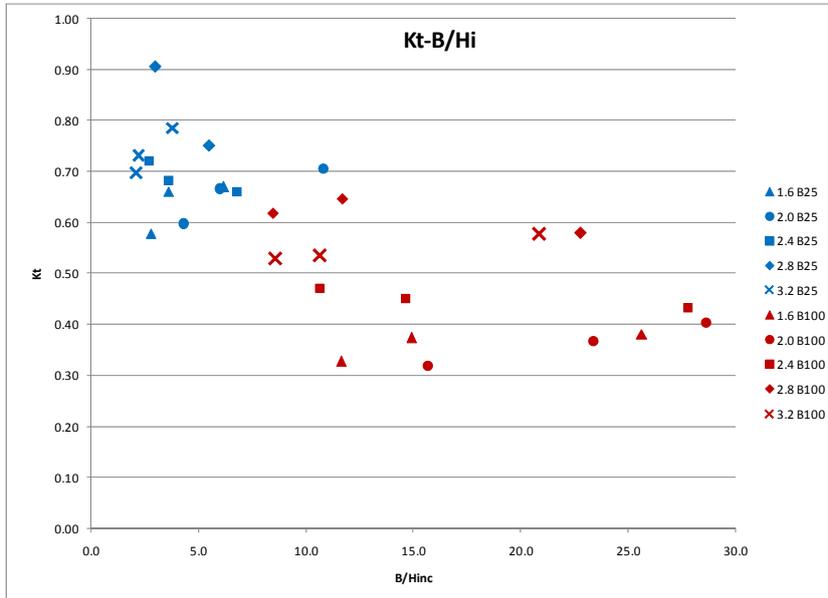


Figura 3.27 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati al variare di B/H_{inc} (blu $B=25$ cm, rosso $B=100$ cm)

3.6.1 Confronto con formule di letteratura (trasmissione)

Come per l'analisi della riflessione del moto ondoso anche per la trasmissione è stato effettuato un confronto con le formule di letteratura esistenti e usualmente utilizzate per analisi e progettazione di opere di difesa.

La prima formula utilizzata è quella di Van der Meer (1990), molto semplice in quanto lineare rispetto alla variabile R_c/H_{si} (quota cresta barriera adimensionalizzata) con i coefficienti della retta tarati in funzione del database a disposizione dell'autore:

$$K_t = -0.30 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.46.$$

Tale relazione fornisce valori del coefficiente di trasmissione minori di zero e superiori all'unità a seconda dei valori di R_c/H_{si} , per questo motivo l'applicabilità della formula è limitata in modo da mantenere il K_t compreso tra 0.1 e 0.8.

Una relazione più precisa, tenendo essa in conto anche la larghezza della cresta sempre adimensionalizzata rispetto ad H_{si} , è quella di D'Angremond et al. (1996). Alla struttura iniziale della formula gli stessi autori hanno introdotto un coefficiente che tenesse in conto le caratteristiche della presenza del paramento dell'opera, del periodo dell'onda incidente nonché porosità e scabrezza della mantellata:

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + d \left(\frac{R_c}{H_{si}} \right)^{-0.31}, \text{ in cui } d = c [1 - e^{-0.5\xi_p}],$$

con ξ_p parametro di Iribarren di picco, e c coefficiente che vale 0.8 per strutture lisce non porose e 0.64 per gettate di massi.

La relazione non può essere applicata per onde molto ripide ($s_p \geq 0.06$), frangenti ($H_{si}/d \geq 0.54$) e per strutture molto sommerse o emerse ($\frac{R_c}{H_{si}} < -2.5$ e $\frac{R_c}{H_{si}} > 2.5$). Anche in questo caso il coefficiente è stato limitato tra i valori 0.075 e 0.8.

Altra relazione utilizzata è quella proposta da Briganti et al. (2003) che risulta essere una modifica alla formula di D'Angremond per migliorarne l'accuratezza per i casi di barriere sommerse con ampio coronamento, quando il rapporto B/H_{si} è maggiore di 10. Anche se gli autori propongono di applicare la propria relazione solo nel caso appena menzionato, non verificandosi mai per il presente studio, si è comunque deciso di calcolare i coefficienti con la formula da loro proposta in modo da valutare anche le differenze con quella originaria di D'Angremond. La formula per il calcolo del K_t è la seguente:

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51 [1 - \exp(-0.41\xi_p)] \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65},$$

limitando i valori del coefficiente tra $K_{t,max} = 0.93 - 0.006 \frac{B}{H_{si}}$ e $K_{t,min} = 0.05$.

L'applicabilità della relazione di Briganti et al. è ristretta ai casi in cui $0.002 \leq s_p \leq 0.07$ e $\frac{H_{si}}{D_{50}} < 6$; inoltre non può essere applicata al caso in cui si verifichi contemporaneamente $\frac{R_c}{H_{si}} > 1$ e $\frac{H_{si}}{D_{50}} < 1$.

L'ultima formula utilizzata è quella di Seabrooke e Hall (1998), che considera la porosità della barriera (come nel caso qui analizzato).

$$K_t = 1 - \left[e^{\left(-0.65 \left| \frac{R_c}{H_{si}} \right| - 1.09 \left(\frac{H_{si}}{B} \right) \right)} + 0.047 \left| \frac{B \cdot R_c}{L_{pi} \cdot D_{50}} \right| - 0.067 \left| \frac{H_{si} \cdot R_c}{B \cdot D_{50}} \right| \right]$$

I parametri geometrici che entrano in gioco nella formula sono gli stessi delle relazioni descritte in precedenza, in particolare la porosità è considerata attraverso l'introduzione del D_{50} dei massi costituenti la struttura. Nello specifico poi $\frac{B \cdot R_c}{L_{pi} \cdot D_{50}}$ rappresenta le perdite di carico associate al flusso attraverso il corpo della struttura mentre $\frac{H_{si} \cdot R_c}{B \cdot D_{50}}$ le dissipazioni per attrito.

I risultati dell'applicazione delle formule sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono per $B=25\text{cm}$ e $B=100\text{cm}$.

Tabella 3.11 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_t simulati e calcolati con formule di letteratura (B=25cm)

| | K_t | T_{input} (s) | kd | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | B/L | B/ H_{si} | Num. Iribarren | Rc/ H_{si} | K_t Seabrook e Hall (1998) | K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) |
|------------|-------------|--------------------|------|------------------|------------------|------|-------------|-------------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| H37T16_B25 | 0.67 | 1.60 | 0.89 | 4.06 | 2.72 | 0.09 | 6.16 | 5.06 | -1.23 | 0.63 | 0.80 | 0.80 | 0.57 |
| H37T20_B25 | 0.71 | 2.00 | 0.68 | 2.31 | 1.63 | 0.07 | 10.80 | 8.37 | -2.16 | 0.78 | 0.80 | 0.80 | 0.86 |
| H37T24_B25 | 0.66 | 2.40 | 0.55 | 3.68 | 2.43 | 0.06 | 6.80 | 7.97 | -1.36 | 0.66 | 0.80 | 0.80 | 0.62 |
| H37T28_B25 | 0.75 | 2.80 | 0.47 | 4.57 | 3.43 | 0.05 | 5.48 | 8.34 | -1.10 | 0.61 | 0.79 | 0.80 | 0.55 |
| H37T32_B25 | 0.79 | 3.20 | 0.41 | 6.62 | 5.20 | 0.04 | 3.78 | 7.92 | -0.76 | 0.56 | 0.69 | 0.72 | 0.47 |
| H70T16_B25 | 0.66 | 1.60 | 0.89 | 6.95 | 4.58 | 0.09 | 3.60 | 3.87 | -0.72 | 0.56 | 0.68 | 0.66 | 0.43 |
| H70T20_B25 | 0.67 | 2.00 | 0.68 | 4.18 | 2.78 | 0.07 | 5.98 | 6.23 | -1.20 | 0.63 | 0.80 | 0.80 | 0.57 |
| H70T24_B25 | 0.68 | 2.40 | 0.55 | 7.00 | 4.78 | 0.06 | 3.57 | 5.78 | -0.71 | 0.56 | 0.67 | 0.69 | 0.45 |
| H70T28_B25 | 0.91 | 2.80 | 0.47 | 8.43 | 7.64 | 0.05 | 2.96 | 6.14 | -0.59 | 0.56 | 0.64 | 0.67 | 0.44 |
| H70T32_B25 | 0.73 | 3.20 | 0.41 | 11.49 | 8.40 | 0.04 | 2.18 | 6.01 | -0.44 | 0.58 | 0.59 | 0.65 | 0.43 |
| H10T16_B25 | 0.58 | 1.60 | 0.89 | 8.99 | 5.20 | 0.09 | 2.78 | 3.40 | -0.56 | 0.56 | 0.63 | 0.60 | 0.39 |
| H10T20_B25 | 0.60 | 2.00 | 0.68 | 5.79 | 3.45 | 0.07 | 4.32 | 5.29 | -0.86 | 0.57 | 0.72 | 0.72 | 0.48 |
| H10T24_B25 | 0.72 | 2.40 | 0.55 | 9.32 | 6.72 | 0.06 | 2.68 | 5.00 | -0.54 | 0.56 | 0.62 | 0.65 | 0.42 |
| H10T28_B25 | 0.93 | 2.80 | 0.47 | 11.41 | 10.61 | 0.05 | 2.19 | 5.28 | -0.44 | 0.58 | 0.59 | 0.64 | 0.42 |
| H10T32_B25 | 0.70 | 3.20 | 0.41 | 11.85 | 8.24 | 0.04 | 2.11 | 5.92 | -0.42 | 0.59 | 0.59 | 0.65 | 0.43 |

Tabella 3.12 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_t simulati e calcolati con formule di letteratura ($B=25\text{cm}$)

| | K_t | T_{input} (s) | k_d | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | B/L | B/ H_{si} | Num. Iribarren | R_c/H_{si} | K_t Seabrook e Hall (1998) | K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) |
|-------------|-------------|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| H37T16_B100 | 0.38 | 1.60 | 0.89 | 3.90 | 1.48 | 0.35 | 25.64 | 5.16 | -1.28 | 0.57 | 0.80 | 0.73 | 0.50 |
| H37T20_B100 | 0.40 | 2.00 | 0.68 | 3.49 | 1.41 | 0.27 | 28.64 | 6.81 | -1.43 | 0.61 | 0.80 | 0.79 | 0.56 |
| H37T24_B100 | 0.43 | 2.40 | 0.55 | 3.60 | 1.56 | 0.22 | 27.78 | 8.05 | -1.39 | 0.60 | 0.80 | 0.78 | 0.54 |
| H37T28_B100 | 0.58 | 2.80 | 0.47 | 4.39 | 2.54 | 0.19 | 22.79 | 8.51 | -1.14 | 0.54 | 0.80 | 0.70 | 0.46 |
| H37T32_B100 | 0.58 | 3.20 | 0.41 | 4.80 | 2.78 | 0.16 | 20.83 | 9.30 | -1.04 | 0.51 | 0.77 | 0.66 | 0.43 |
| H70T16_B100 | 0.37 | 1.60 | 0.89 | 6.70 | 2.51 | 0.35 | 14.93 | 3.94 | -0.75 | 0.41 | 0.68 | 0.54 | 0.33 |
| H70T20_B100 | 0.37 | 2.00 | 0.68 | 4.28 | 1.57 | 0.27 | 23.39 | 6.16 | -1.17 | 0.54 | 0.80 | 0.70 | 0.47 |
| H70T24_B100 | 0.45 | 2.40 | 0.55 | 6.83 | 3.08 | 0.22 | 14.65 | 5.85 | -0.73 | 0.42 | 0.68 | 0.56 | 0.34 |
| H70T28_B100 | 0.65 | 2.80 | 0.47 | 8.56 | 5.54 | 0.19 | 11.68 | 6.09 | -0.58 | 0.37 | 0.64 | 0.52 | 0.30 |
| H70T32_B100 | 0.54 | 3.20 | 0.41 | 9.40 | 5.04 | 0.16 | 10.64 | 6.65 | -0.53 | 0.36 | 0.62 | 0.51 | 0.29 |
| H10T16_B100 | 0.33 | 1.60 | 0.89 | 8.60 | 2.82 | 0.35 | 11.63 | 3.47 | -0.58 | 0.36 | 0.63 | 0.48 | 0.28 |
| H10T20_B100 | 0.32 | 2.00 | 0.68 | 6.38 | 2.03 | 0.27 | 15.67 | 5.04 | -0.78 | 0.43 | 0.69 | 0.56 | 0.35 |
| H10T24_B100 | 0.47 | 2.40 | 0.55 | 9.41 | 4.44 | 0.22 | 10.62 | 4.98 | -0.53 | 0.36 | 0.62 | 0.49 | 0.28 |
| H10T28_B100 | 0.62 | 2.80 | 0.47 | 11.84 | 7.32 | 0.19 | 8.45 | 5.18 | -0.42 | 0.33 | 0.59 | 0.47 | 0.26 |
| H10T32_B100 | 0.53 | 3.20 | 0.41 | 11.68 | 6.18 | 0.16 | 8.56 | 5.96 | -0.43 | 0.33 | 0.59 | 0.48 | 0.27 |

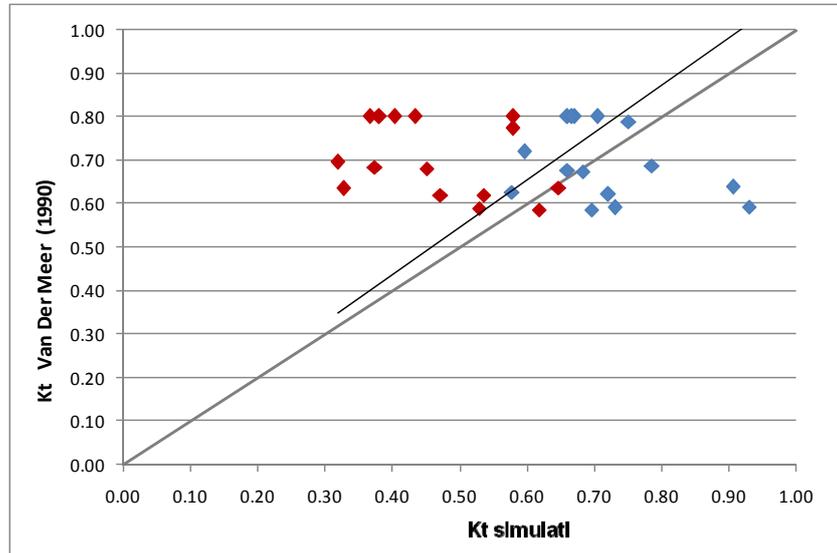


Figura 3.28 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Van Der Meer (1990) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)

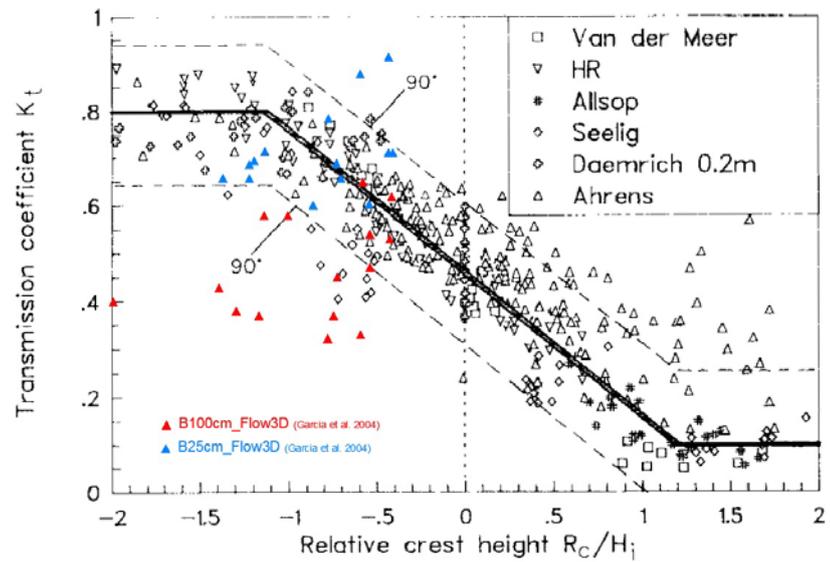


Figura 3.29 Confronto K_t simulati con database di dati usati da Van Der Meer (1990) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)

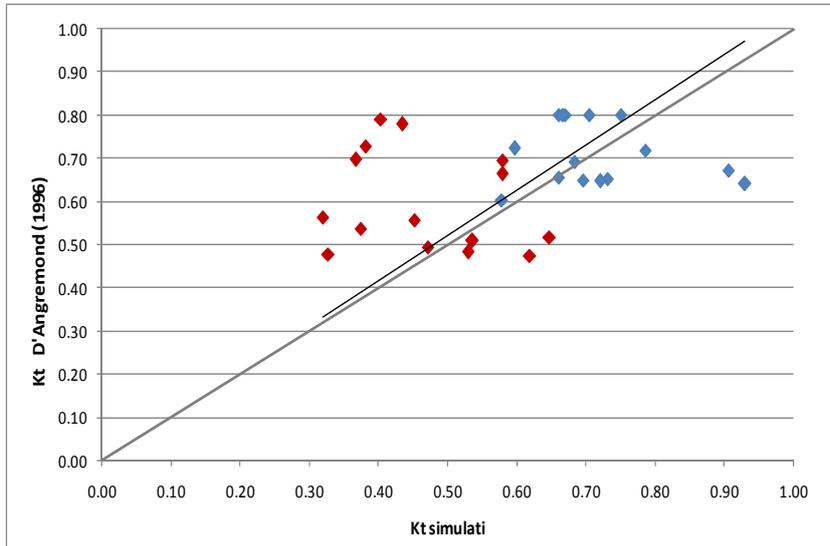


Figura 3.30 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di d'Angremond (1996) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)

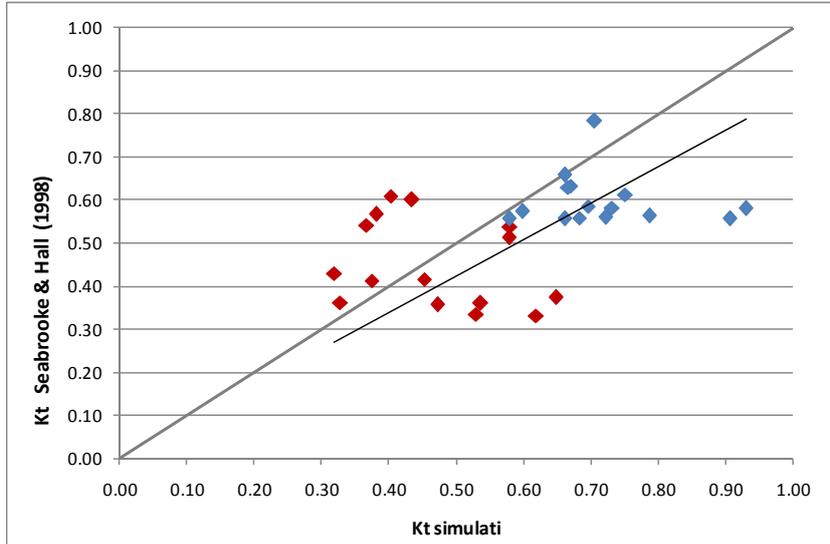


Figura 3.31 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Seabrooke e Hall (1998) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)

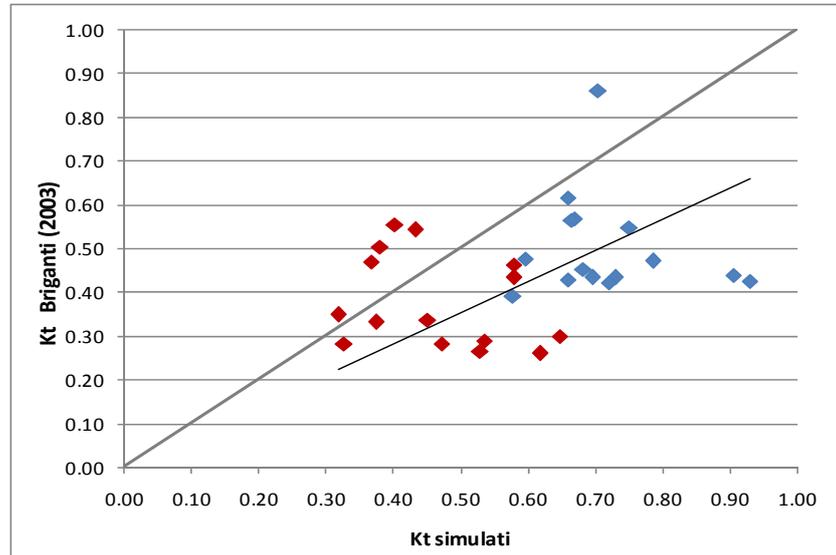


Figura 3.32 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Briganti (2003) (blu_B=25cm, rosso_B=100cm)

Le relazioni di D'Angremond et al. (1996) e di Seabrooke e Hall (1998) sono quelle che meglio riproducono i risultati ottenuti. Le due relazioni tengono in conto di altre caratteristiche geometriche della barriera sommersa (rispetto alla semplice relazione di Van der Meer) che giocano un ruolo importante nel processo di abbattimento dell'energia del moto ondoso incidente la costa e, pertanto, risultano migliori da un punto di vista predittivo.

Dall'analisi dell'RMSE, riportato nel grafico seguente, si evince come la formula di Seabrooke e Hall dia l'errore minore se si considerano complessivamente tutti i K_t simulati. Se invece si guarda ai risultati aggregandoli per la barriera con $B=25\text{cm}$ e $B=100\text{cm}$, si ricava che per la prima la relazione di D'Angremond fornisce un errore minore, mentre per la seconda è la formula di Seabrooke e Hall.

Tabella 3.13 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=25cm e B=100cm)

| K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) | K_t Seabrooke e Hall. (1998) |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 0.29 | 0.22 | 0.19 | 0.17 |

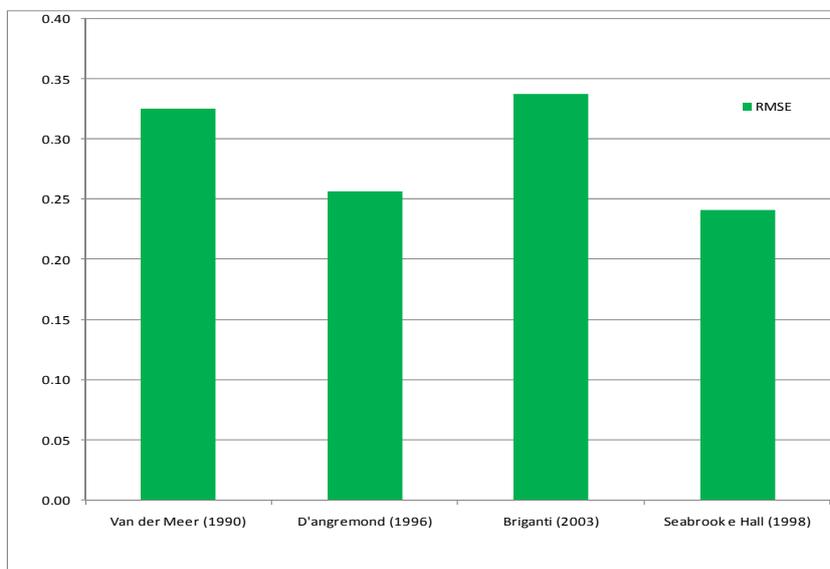


Figura 3.33 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=25cm, B=100cm)

Tabella 3.14 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=25cm)

| K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) | K_t Seabrooke e Hall. (1998) |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 0.15 | 0.13 | 0.28 | 0.17 |

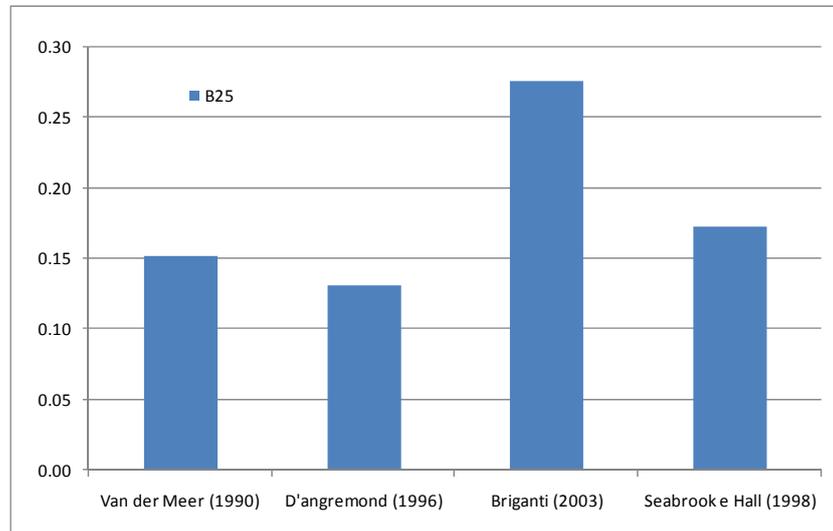


Figura 3.34 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=25cm)

Tabella 3.15 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t (B=100cm)

| K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) | K_t Seabrooke e Hall. (1998) |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 0.29 | 0.22 | 0.19 | 0.17 |

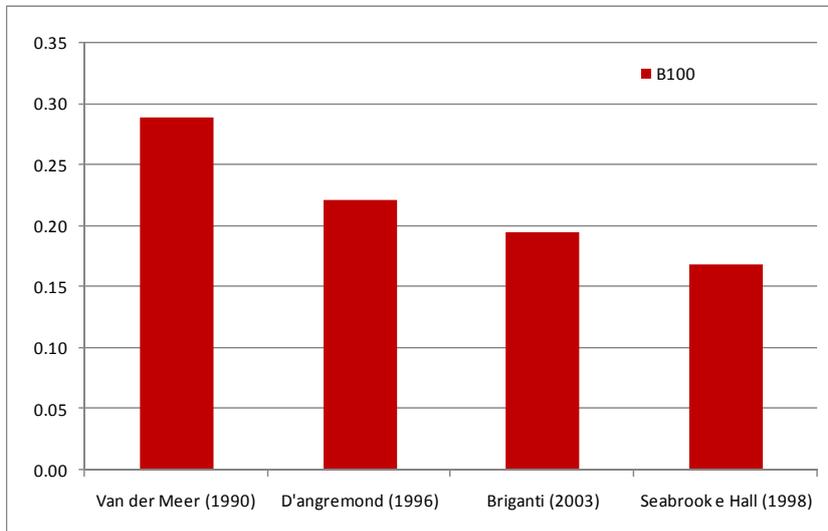


Figura 3.35 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t (B=100cm)

3.7 ANALISI DEL SETUP

Il setup è un parametro che è opportuno valutare in sede progettuale per indagare le condizioni che si instaurano a tergo delle barriere sommerse riguardanti la circolazione nella zona protetta e i flussi di ritorno verso largo.

Il set up, definito come l'innalzamento del livello medio del mare a causa del moto ondoso incidente, è stato valutato in ogni ascissa del dominio come media della sopraelevazione del pelo libero registrata nel calcolo numerico.

L'analisi condotta per i casi con a base le sperimentazioni di Vidal et al ha permesso di ricavare indicazioni sul comportamento della barriera soffolta, nonché sull'applicabilità di alcuni metodi di calcolo del setup presenti in letteratura.

In primo luogo, la calibrazione effettuata sui dati sperimentali di Vidal et per il test case utilizzato ha dato, come precedentemente evidenziato, esiti incoraggianti (cfr. paragrafo 3.3).

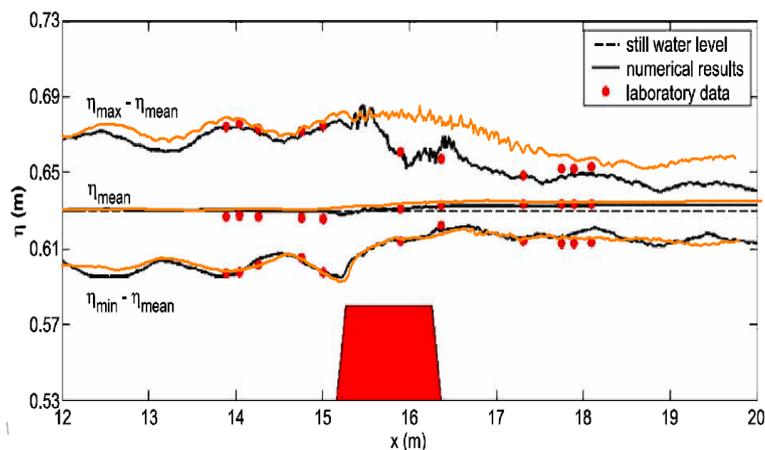


Figura 3.36 Risultati calibrazione setup, test case da Vidal et al., 2001 ($H=7\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$), in arancione i risultati della calibrazione in FLOW-3D

La fase seguente è stata la verifica dell'efficacia del sistema di ricircolo posto a tergo della barriera che permette di condurre l'esperimento numerico sia per il caso reale di barriere molto estese in direzione

parallela alla costa (senza il ricircolo attivato) che per barriere brevi ed interrotte (ricircolo attivato).

Quando le barriere si estendono molto in larghezza parallelamente alla costa creano, sostanzialmente, dei bacini chiusi a tergo di esse formando una barriera che impedisce la formazione di un flusso di ritorno verso largo per bilanciare lo squilibrio energetico dovuto al trasporto di quantità di moto associata alle onde. Per questo motivo il setup che si instaura è più elevato che nel caso di barriere interrotte, che permettono un ricircolo verso largo (Ruol et al., 2003).

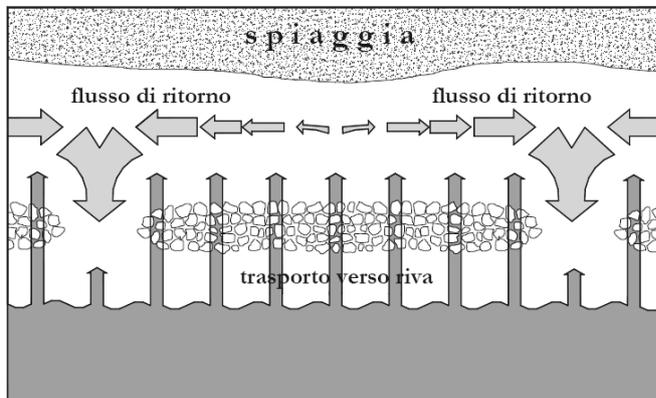


Figura 3.37 Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera a cresta bassa (Ruol et al., 2003)

Come ci si aspettava il caso in presenza di flusso di ritorno ha portato a valori più bassi del setup a tergo della barriera, mostrando l'efficacia del sistema di ricircolo nel simulare la condizione fisica reale in sito (cfr Figura 3.38).

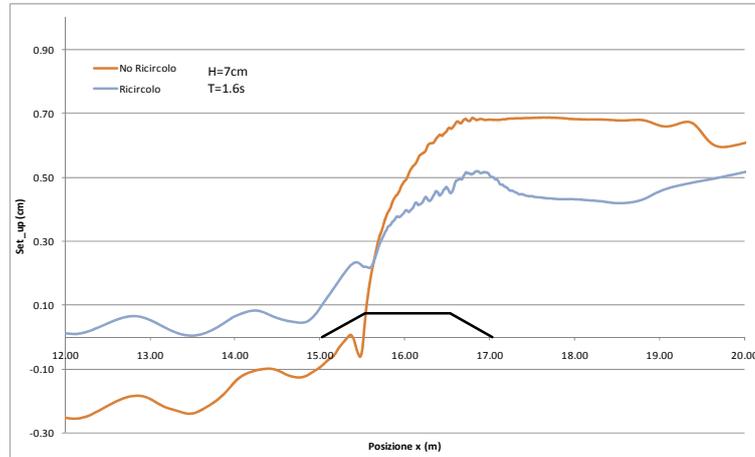


Figura 3.38 Setup con e senza ricircolo attivato, test case da Vidal et al., 2001 ($H=7\text{cm}$, $T=1.6\text{s}$)

L'analisi è seguita con l'indagare l'applicabilità di alcune formule di letteratura basate su indagini sperimentali. In primo luogo è stata applicata la formula di Loveless (1998).

L'idea alla base della formula è che la barriera funzioni come una diga in cui l'altezza d'onda è il battente idraulico: l'acqua che passa nella zona protetta non è bilanciata dal flusso di ritorno (quest'ultimo è costretto a fluire, parzialmente, attraverso la barriera) creando uno squilibrio nel flusso di massa che genera un aumento del livello nel lato offshore fino al raggiungimento dello stato di equilibrio. Sostanzialmente il valore di δ è modellato come il carico idraulico necessario a rimandare verso largo, attraverso la filtrazione nella barriera, il volume scaricato dall'onda incidente nella metà del suo periodo.

La formula finale considera diversi parametri geometrici della barriera e caratteristici del moto ondoso già ampiamente discussi nei paragrafi precedenti. Il valore risultante del setup a tergo della barriera è una funzione lineare del parametro B, il che è fisicamente poco realistico.

$$\frac{\delta}{B} = \frac{(H_i L / \pi h_l T)^2}{g D_{50}} 1.23 \exp \left[-20 \left(\frac{R_c}{h_c} \right)^2 \right]$$

Nei casi simulati (B pari a 25cm e 100cm) si nota come i risultati numerici siano molto lontani da quelli previsti dalla formula per il caso B100 mentre si collocano meglio per il caso di barriera a cresta più stretta, B25.

Sostanzialmente la formula di Loveless applicata a barriere sommerse a cresta stretta porterebbe a valori di setup talvolta leggermente superiori e, quindi, ragionevolmente a vantaggio di sicurezza; mentre per creste larghe sembra sovrastimare eccessivamente i valori. Considerando l'assunto alla base della formula (comportamento della barriera come diga) sembra essere migliore la sua applicazione a barriere emerse.

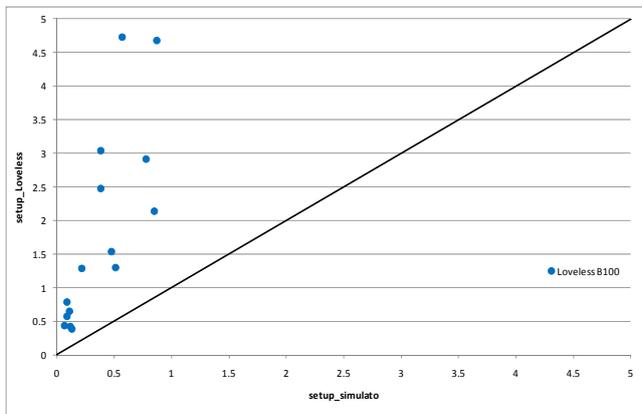


Figura 3.39 Confronto valori setup da formula di Loveless con quelli simulati ($B=100\text{cm}$)

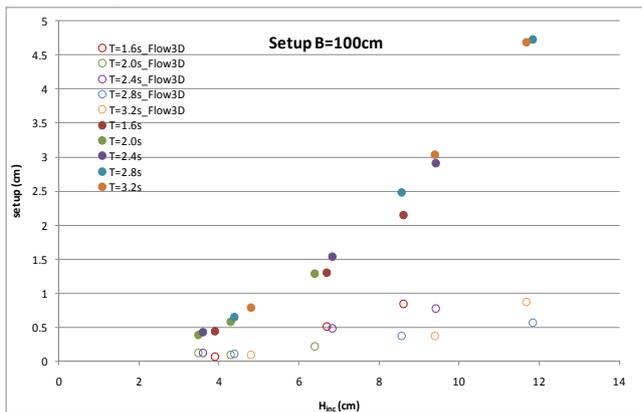


Figura 3.40 Confronto valori setup da formula di Loveless (pieni) con quelli simulati (vuoti) ($B=100\text{cm}$)

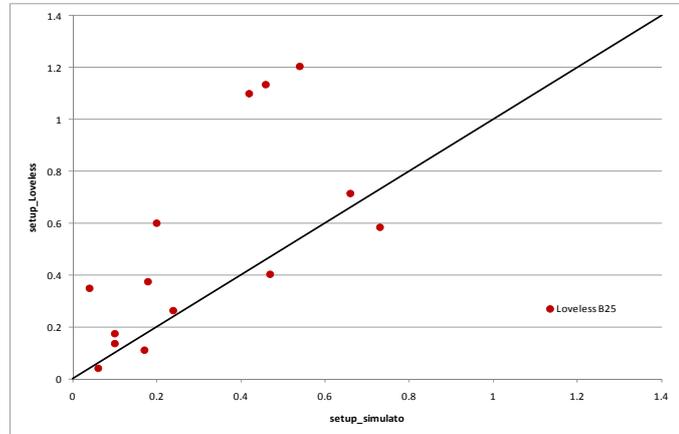


Figura 3.41 Confronto valori setup da formula di Loveless con quelli simulati (B=25cm)

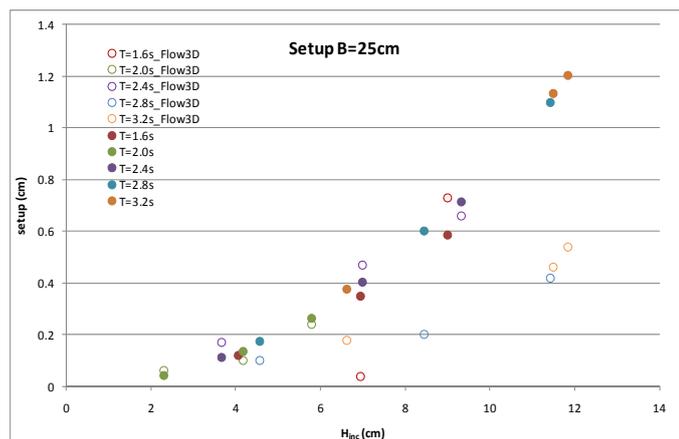


Figura 3.42 Confronto valori setup da formula di Loveless (pieni) con quelli simulati (vuoti) (B=25cm)

Nella attività di studio sul setup è stata implementata anche la metodologia proposta da Calabrese et al. (2008). Gli autori applicano un metodo concettuale che parte dal lavoro di Dalrymple e Dean (1971) che, analizzando i dati di Diskin et al. del 1970 avevano sottolineato come era necessario includere il contributo al setup dovuto ai fenomeni di riflessione e trasmissione, come già indicato da Longuet-Higgins nel 1967. La procedura, valida solo per le barriere sommerse, assume che il setup dovuto al moto ondoso sia in parte dovuto al flusso della quantità

di moto generato dal fenomeno di breaking che subisce l'onda sulla barriera, e in parte alla necessità di avere una corrente di ritorno verso largo per compensare il flusso di massa d'acqua che entra nella zona protetta scavalcando la barriera. Determinano il setup, quindi, come somma di due contributi: quello dovuto al trasporto di massa sopra la barriera (δ_c) e quello del flusso di quantità di moto (δ_{mf}):

$$\delta = \delta_c + \delta_{mf}.$$

Calabrese et al. (2008) con il loro studio portano alcuni miglioramenti alla procedura di Dalrymple e Dean considerando la possibilità di avere flusso di quantità di moto anche quando la rottura dell'onda avviene sulla barriera, che tale flusso dovrebbe aumentare all'aumentare del parametro B e la necessità di considerare i coefficienti Kr e Kt.

Il δ_{mf} è calcolato mediante un bilancio orizzontale della quantità di moto ad un volume di controllo che circonda la struttura sommersa, in modo da includere i contributi di Kr e Kt ed indirettamente di B.

Il δ_c , trasporto dovuto alla continuità, è modellato considerando il carico idraulico necessario ad equilibrare la resistenza opposta alla corrente di undertow verso largo generata dalla struttura.

Considerando lo schema riportato in Figura 3.43 gli autori, sotto le ipotesi di periodo dell'onda invariato durante il passaggio sulla barriera e di non generazioni di alte frequenze nell'onda nella parte protetta, effettuano un bilancio della quantità di moto al volume delimitato dalle verticali I e II.

Nella figura $S_{xx, I-II}$ sono le componenti di radiation stress, $\Delta\Pi$ la forza netta orizzontale esercitata dalla struttura sul volume di fluido, P_{I-II} le pressioni idrostatiche.

Dal bilancio e da alcune approssimazioni sulla componente $\Delta\Pi$ si ricava il δ_{mf} come soluzione di una semplice equazione di secondo grado del tipo:

$$\delta_{mf} = 0.5 \left[-b + \sqrt{(b^2 - 4c)} \right],$$

con:

$$b = 2h - A, A = \left\{ \left[1 + \frac{x_b+B}{L_s} \right] h_c - \left[x_b \frac{h_b+R_c}{L_s} \right] \right\}$$

$$c = -\frac{1}{8} H_t^2 \left[1 + \frac{4kh}{\sinh(2kh)} \right] (1 + K_r^2 - K_t^2),$$

i parametri sono tutti riportati nella relativa figura.

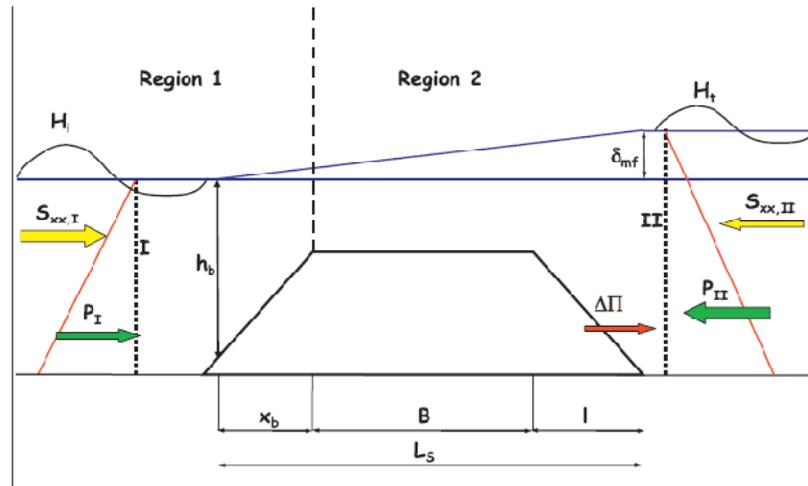


Figura 3.43 (Calabrese et al., 2008)

Importante è la determinazione della profondità di breaking (h_b) che gli autori suggeriscono di determinare considerando il criterio di Iwata e Kiyono (1985) se h_b risultante dall'applicazione di tale criterio è maggiore di R_c (sommersione), le onde collasano sul fronte della struttura. Nel caso h_b risultante fosse minore di R_c vuol dire che le onde possono frangere sulla cresta se H_I è maggiore di H_b^{cr} (da Hur et al. (2003)), e quindi h_b coincide con la sommersione R_c . Se l'altezza incidente poi è minore di H_b^{cr} le onde passano sulla struttura senza rompersi e quindi il setup generato da questo fenomeno è nullo.

Nell'applicazione di tale metodologia al caso numerico studiato il valore di x_b è stato posto uguale a zero assumendo che le onde si rompano sul coronamento della struttura, e quindi $h_b=R_c$.

Il contributo δ_c è calcolato considerando che l'interazione tra la corrente di ritorno verso largo e la barriera generi degli sforzi che si oppongono al moto che vengono compensati da un aumento del carico idrostatico nell'area protetta. Il δ_c è determinato mediante una legge di resistenza idraulica del tipo

$$\delta_c = \frac{q_{in}^2}{f^2 |R_c|^{10/3}} B_{eq}.$$

B_{eq} è ricavabile in Figura 3.43 mentre f è un coefficiente d'attrito, che va calibrato ma sperimentalmente assume valore prossimo a 10, q_{in} è il volume d'acqua in ingresso nel volume di controllo calcolato come $q_{in} = \sqrt{gh^*}H(B_0 \frac{H}{h^*} + 0.06)$, con h^* posta uguale alla sommergenza R_c e $H = \bar{H} = H_i(1 + K_t)/2$.

L'implementazione di questo metodo per le simulazioni numeriche ha fornito risultati maggiormente coerenti, rispetto all'applicazione del metodo di Loveless, per entrambi i casi indagati ($B=25\text{cm}$ e $B=100\text{cm}$) anche se non è identificabile un trend generale (cfr figure seguenti).

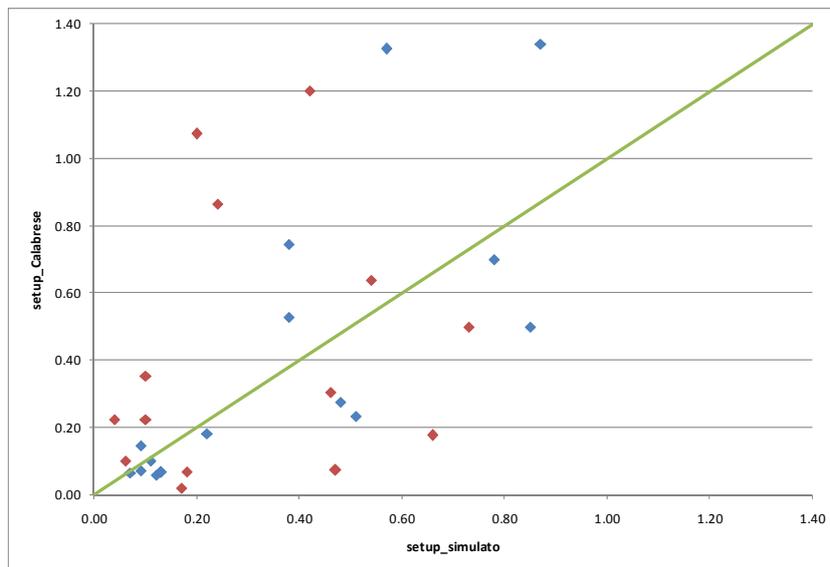


Figura 3.44 Confronto valori setup calcolati con il metodo da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati (rosso_B=25cm, blu_B=100cm)

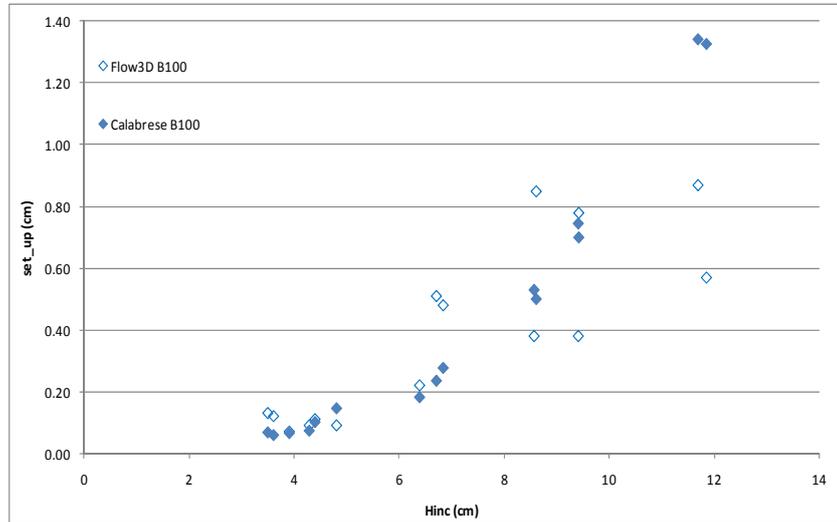


Figura 3.45 Confronto valori setup da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati al variare di H_{inc} (blu_B=100cm)

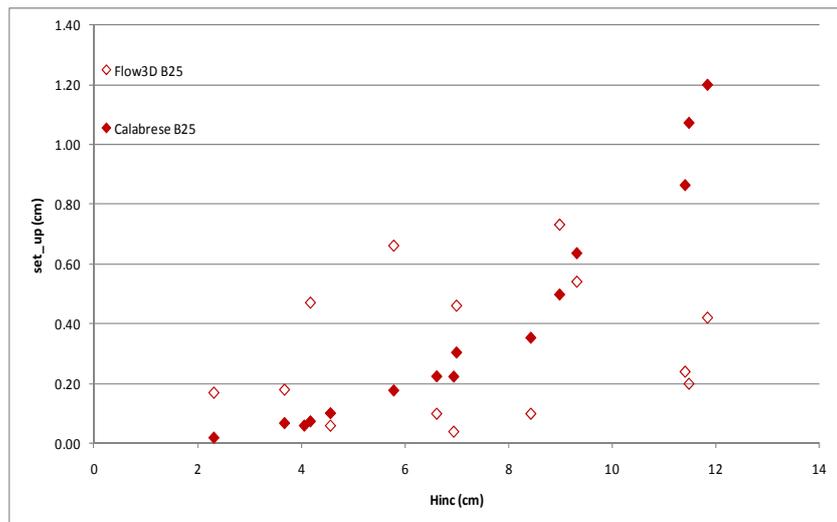


Figura 3.46 Confronto valori setup da Calabrese et al. (2008) con quelli simulati al variare di H_{inc} (rosso_B=25cm)

Questo metodo di calcolo, derivato da indagini sperimentali, presuppone la conoscenza dei coefficienti di riflessione e trasmissione. Per questo motivo si presta ad essere integrato in fase progettuale con un supporto

di modellazione fisica o numerica. In questo caso, il vantaggio di poter condurre simulazioni numeriche con risultati ottenibili in tempi relativamente brevi darebbe un congruo supporto all'indagine di questo particolare aspetto.

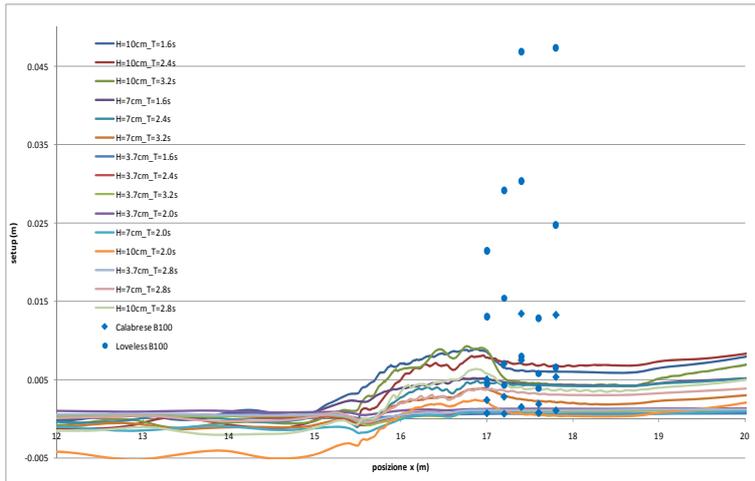


Figura 3.47 Andamento con le ascisse del setup simulato e valori da relazione di Loveless e Calabrese (B=100cm)

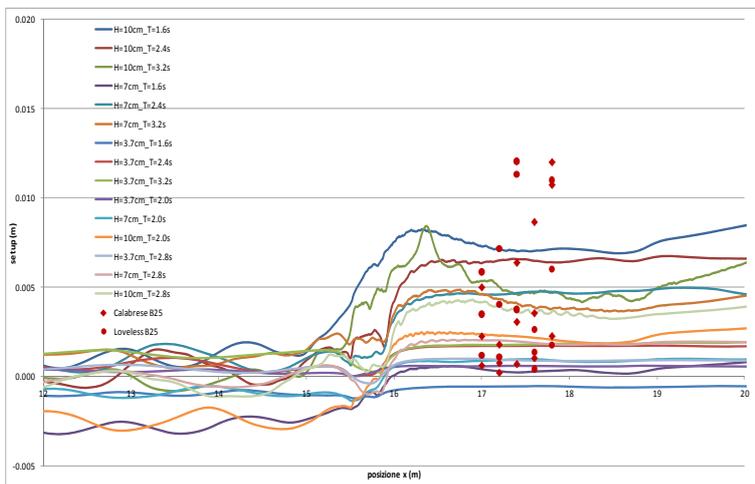


Figura 3.48 Andamento con le ascisse del setup simulato e valori da relazione di Loveless e Calabrese (B=25cm)

4 MODELLAZIONE FISICA DI UN RIPASCIMENTO PROTETTO: PROVE IN LABORATORIO DEL CASO STUDIO DELLA SPIAGGIA DI CALABAIA DI BELVEDERE MARITTIMO (CS)

Una parte dell'attività di ricerca ha riguardato la modellazione fisica di un caso studio, quello del ripascimento protetto della spiaggia di Calabaia di Belvedere Marittimo (CS), svolta presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Catania, sotto la guida del Prof. E. Foti e del suo gruppo di ricerca.

Lo studio si inseriva all'interno del progetto di ricerca del POR Calabria 2000-2006, Asse 1, Misura 1.4, Azione 1.4c, Lotto progettuale 10: (Studio e sperimentazione di metodologie e tecniche per la mitigazione del rischio idrogeologico), *Studio dell'evoluzione morfologica di opere di ripascimento protette al piede da barriere soffolte*.

Tale esperienza è apparsa necessaria al fine di meglio comprendere i meccanismi fisici insiti nell'interazione onda struttura sommersa da riprodurre ed analizzare poi numericamente, nonché per l'approfondimento di una tecnica di indagine fondamentale e sempre applicata attualmente per gli interventi di ingegneria costiera da realizzare o già realizzati, come appunto il caso di ripascimento protetto analizzato. Nel presente capitolo si riporta giusto una sintesi sull'attività personalmente seguita e si rimanda alla pubblicazione ufficiale per maggiori dettagli e per i risultati ottenuti.

4.1 INTRODUZIONE ALLA MODELLAZIONE FISICA DEL TRATTO DI LITORALE SOGGETTO A RIPASCIMENTO PROTETTO

Gli interventi di ripascimento protetti sono stati, negli ultimi anni, molto utilizzati lungo le coste italiane data la loro intrinseca capacità di coniugare due esigenze: la riduzione del materiale sciolto necessario per effettuare il ripascimento, specie dove le pendenze dei fondali sono molto elevate, l'incremento della stabilità nel tempo dell'intervento stesso con conseguente riduzione di successivi interventi periodici di manutenzione. In pratica si ricostruisce il profilo di spiaggia versando materiale fino ad una data profondità; al largo di questa, viene posta una barriera di protezione sommersa, usualmente in massi naturali, che interrompe tale profilo al punto che esso raggiungerebbe in condizioni di equilibrio. Tali barriere di protezione sostanzialmente servono a smorzare l'energia del moto ondoso incidente la spiaggia, favorendo così la riduzione dei meccanismi responsabili del trasporto offshore di sedimenti, nonché da separazioni fisiche per i sedimenti che si sposterebbero verso largo per effetto di correnti di ritorno sul fondale. Per i motivi brevemente esposti appare chiaro come una barriera a protezione di un ripascimento possa trovarsi ad una profondità tale da non avere funzionamento analogo ad una barriera frangiflutti sommersa, usualmente posta in opera con livelli di sommergenza compresi tra 0.5-1m.

Un'analisi di un intervento prima descritto, che preveda una modellazione fisica e/o numerica, deve tenere in conto sia gli aspetti morfodinamici che concernono l'evoluzione del profilo di spiaggia sia quelli legati alla stabilità della struttura (scavi al piede e a tergo, dislocazione massi) realizzata in profondità a protezione del profilo.

Senza voler entrare nella letteratura che concerne l'analisi idromorfodinamica dei ripascimenti protetti, che esula da tale lavoro, va sottolineato come esistano numerosi studi sull'evoluzione dei profili di spiaggia (ad es. Dean, 1991) e sull'efficacia delle barriere sommerse (Calabrese et al., 2005, 2008, Burcharth et al., 2006).

Gli studi presenti in letteratura sono particolarmente indirizzati all'ottimizzazione dei parametri di progetto dell'intervento di ripascimento protetto e spesso le strutture vengono modellate come strutture impermeabili mentre nella realtà esse sono realizzate in massi naturali. Le domande alla base dell'indagine sperimentale condotta dal

DICA dell'Università di Catania sono state volte a colmare un vuoto per quello che riguarda la gestione di questa tipologia di interventi con particolare attenzione alla stabilità della struttura sommersa, ai meccanismi di scavo a tergo e al piede della struttura, alla granulometria del materiale per permettere una opportuna e stabile transizione tra la spiaggia e la barriera, nonché gli eventuali interventi da mettere in atto per migliorare l'efficienza di una barriera già esistente.

Per lo studio realizzato a Catania sono state usate come forzanti meteo marine onde irregolari sia in condizioni di onde morfologiche, o di modellazione, ovvero rappresentative dell'energia ondosa che mediamente interessa il paraggio esposto, sia in condizioni di mareggiate con bassi tempi di ritorno. In particolare si è inizialmente considerata la modellazione della spiaggia per un periodo di tempo corrispondente a quattro anni a scala di prototipo, seguiti da una mareggiata avente tempo di ritorno pari a circa 2 anni.

Per quello che poi maggiormente attiene il confronto con la modellazione numerica sono state effettuate alcune prove in condizioni di onde regolari.

La modellazione fisica è stata effettuata utilizzando una scala geometrica pari a 1:30 in similitudine idraulica di Froude. Per quanto riguarda il dimensionamento dei massi della scogliera di protezione al piede si è utilizzato il criterio di Hudson.

Misure dei livelli idrici e di velocità sono state ottenute sia a monte che a valle della struttura di protezione. Per l'analisi di stabilità della struttura e degli scavi al piede e a tergo della struttura sommersa, è stata utilizzata una innovativa tecnica di rilievo bidimensionale basata sulla computer vision, mentre per quanto concerne il rilievo dell'evoluzione del profilo di spiaggia esso è stato ottenuto sia attraverso la misura con una serie di picchetti graduati, sia attraverso rilievo mediante Laser Scanner 3D.

Alla luce dei risultati ottenuti, e tenendo conto anche di alcune risultanze di campo, che concordano nel testimoniare una notevole instabilità del filtro posto a tergo della struttura, è stata condotta una ulteriore campagna sperimentale, analoga alla precedente, su una configurazione modificata della barriera sommersa. In particolare si è previsto di proteggere lo strato di filtro attraverso la posa in opera di uno strato di massi aventi le stesse caratteristiche di quelli della barriera.

4.2 DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO OGGETTO DI STUDIO

Come riportato in precedenza, è stato identificato come sito prototipo un tratto del litorale in località Calabaia, nel Comune di Belvedere Marittimo (CS). Tale sito ha subito negli anni un pesante fenomeno erosivo per cui è stato deciso di intervenire con un ripascimento protetto che prevedeva:

- frangiflutti sommerso lungo circa 700m con sommergenza di 2.5m s.m.m. posto in opera in massi naturali di II categoria e ubicato a una distanza di circa 225m rispetto al muro del lungomare;
- pennelli di chiusura “a cella” semi-sommersi;
- versamento di circa 600.000m³ di sabbia dalle caratteristiche granulometriche simili a quelle in situ.

Nella Figura 4.1 è mostrata una sezione tipo del ripascimento protetto realizzato.

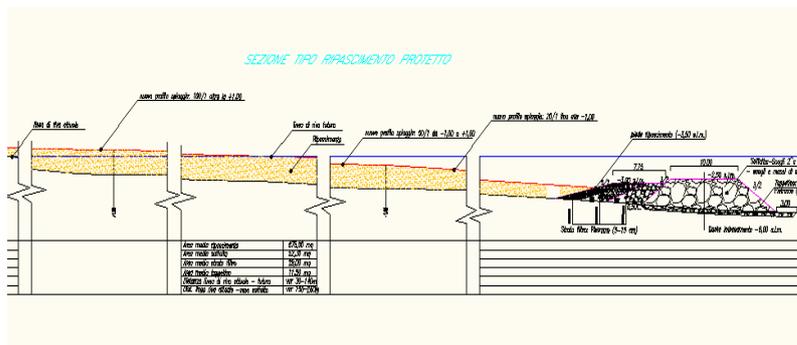


Figura 4.1 Sezione tipo del ripascimento protetto realizzato in località Calabaia nel Comune di Belvedere Marittimo (CS)

Dalla fine della costruzione, nell' anno 2006, è iniziato un monitoraggio dell'evoluzione della spiaggia, con rilievi topo-batimetrici, di cui si hanno i risultati fino al 2008.

Muovendosi dalla sezione di realizzazione della barriera soffolta verso la riva, il profilo di progetto della spiaggia prevedeva una pendenza pari a 1/20 dalla quota della barriera fino alla batimetrica -1m s.m.m., un

successivo tratto con pendenza 1/50 fino alla quota +1m s.m.m. ed infine un tratto con pendenza 1/100.

I parametri essenziali della modellazione fisica sono rappresentati dalle caratteristiche granulometriche, sia della struttura sommersa, sia del ripascimento previsto.

La Tabella 4.1 riporta i diametri medi sia della struttura, costituita in massi appartenenti alla 2° categoria (peso singolo elemento da 1001 kg a 3000kg), sia dello strato di filtro realizzato a tergo della barriera per garantire una graduale transizione granulometrica dal materiale utilizzato per il ripascimento a quello costituente la barriera.

Tabella 4.1 Caratteristiche granulometriche di progetto della barriera soffolta e dello strato di filtro del caso in studio

| barriera | strato filtro a tergo | | |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| | esterno | centrale | interno |
| Massi 2° categoria (1001kg-3000kg) | D ₅₀ (cm) 12 | D ₅₀ (cm) 8 | D ₅₀ (cm) da 3 a 5 |

La Tabella 4.2 riporta invece alcuni parametri della distribuzione granulometrica dei sedimenti utilizzati per la realizzazione dell'intervento di ripascimento.

Tabella 4.2 Caratteristiche granulometriche di progetto del ripascimento del caso in studio

| D ₈₅ (mm) | D ₅₀ (mm) | D ₁₅ (mm) |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 4.5 | 2.8 | 1.5 |

In Figura 4.2 viene mostrata un'immagine dell'area oggetto di studio in cui è stata evidenziata la sezione n°29 che è stata utilizzata poi come riferimento per la realizzazione del modello fisico oltre che di quello numerico.

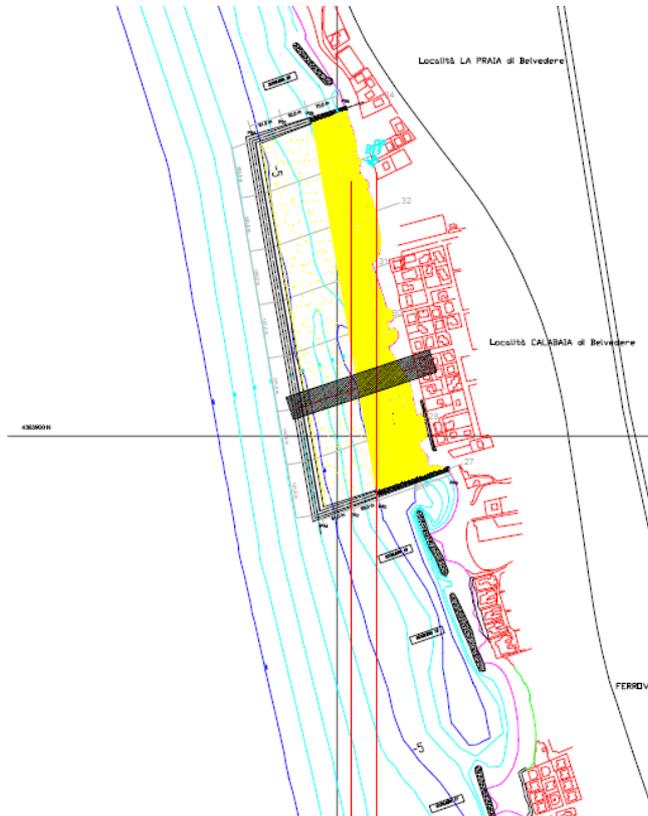


Figura 4.2 Immagine dell'area oggetto di studio in cui è stata evidenziata la sezione n°29 utilizzata come riferimento per la realizzazione del modello numerico.

In tale sezione, trasversale alla linea di riva, si dispone di una serie di rilievi batimetrici dal 2005 al 2008 (Figura 4.2).

Il profilo rilevato nel 2005 mostra come, prima dell'intervento, realizzati nel 2006, il litorale fosse stato oggetto di un forte processo erosivo.

Con riferimento al rilievo effettuato nel 2006, anno di realizzazione del ripascimento in oggetto, tra i punti del rilievo S29-020 e S29-027 si è registrata una zona in cui è presente un cavo, con una profondità massima di 1.30m circa e una estensione massima di circa 24m. Tale discontinuità è frutto del processo di versamento del materiale di

ripascimento e risulta chiaramente visibile anche nel profilo del 2007, ma spostata più a valle e di minore entità. Infine, il rilievo batimetrico del 2008 non presenta più tale discontinuità ed ha un andamento piuttosto regolare (Figura 4.3).

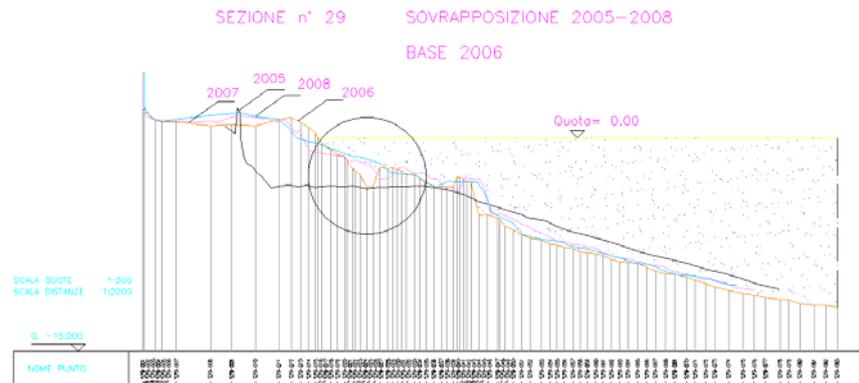


Figura 4.3 Sovrapposizione dei profili rilevati dal 2005 al 2008 in corrispondenza della sezione n° 29 nell'area di esecuzione dell'intervento di ripascimento protetto oggetto di studio

Sono stati inoltre effettuati dei campionamenti di sedimenti a diverse profondità osservando come si abbia, in generale sia prima che dopo l'intervento, una notevole variabilità granulometrica lungo il profilo di spiaggia, con la frazione più grossolana generalmente ubicata a profondità minori e la frazione più fine più al largo. In laboratorio è oggettivamente estremamente difficile operare con un così vasto assortimento granulometrico, pertanto si è deciso di considerare una sola granulometria per il ripascimento, molto prossima ($D_{50}=0.25\text{mm}$) a quella rilevata nell'ultimo anno alla profondità di -4 m, pari a 0.26mm.

Per quanto riguarda il clima meteo marino tipico del sito in esame, sulla base dei dati forniti dal gruppo del DDS (Dipartimento di Difesa del Suolo, Univ. Cosenza), sono stati considerati:

Onda di modellazione paraggio (morfologica):

- $H=1.49\text{m}$, $T=8.01\text{s}$, $\text{Dir}=259^\circ\text{N}$

(Poiché la normale al litorale di Calabaia è 254° , l'energia complessiva delle onde è pressoché ortogonale);

Eventi estremi:

- $H_s=4.76\text{m}$, $T_m=9.82\text{s}$, $T_p=11.82\text{s}$ (per $T_r=5$ anni);
- $H_s=4.89\text{m}$, $T_m=10.14\text{s}$, $T_p=12.21\text{s}$ (per $T_r=10$ anni);

- $H_s=5.02\text{m}$, $T_m=10.55\text{s}$, $T_p=12.7\text{s}$ (per $T_r=25$ anni)
- $H_s=5.07\text{m}$, $T_m=10.98\text{s}$, $T_p=13.04\text{s}$ (per $T_r=50$ anni).

Le direzioni degli eventi estremi hanno un angolo di circa 10° rispetto alla normale al litorale e sono anch'essi, quindi, pressoché ortogonali al litorale.

I dati ondosi sono relativi alla profondità $d=7.2\text{m}$.

4.3 DESCRIZIONE DEL SETUP SPERIMENTALE E DEL MODELLO

4.3.1 Vasca di sperimentazione e strumentazione di misura

La vasca, realizzata in cemento, è a pianta rettangolare di lunghezza 18.00m, larghezza 3.60m e profonda 1.20m. Essa presenta delle pareti in calcestruzzo armato nella parte iniziale e finale, mentre le pareti laterali sono interamente costituite da pannelli in vetro fissati su un'intelaiatura metallica; quest'ultimi consentono di osservare ciò che avviene all'interno della vasca (Figura 4.4 e Figura 4.5).

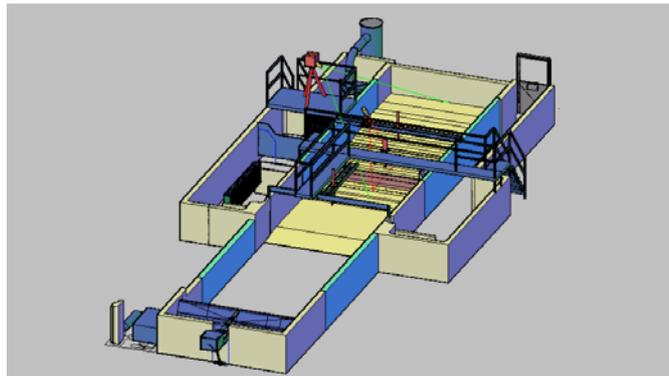


Figura 4.4 Schema 3D della vasca di sperimentazione



Figura 4.5 Vasca con ondogeno in dotazione al Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania

L'apparecchiatura per la generazione del moto ondoso si trova nella parte iniziale della vasca; al fine di attenuare i fenomeni di riflessione la vasca è dotata, alle spalle del battitore, di elementi realizzati con materiale plastico gettato alla rinfusa (Figura 4.6).



Figura 4.6 Particolare dell'ondogeno in dotazione alla vasca

La Figura 4.7 mostra la pianta e la sezione longitudinale della vasca.

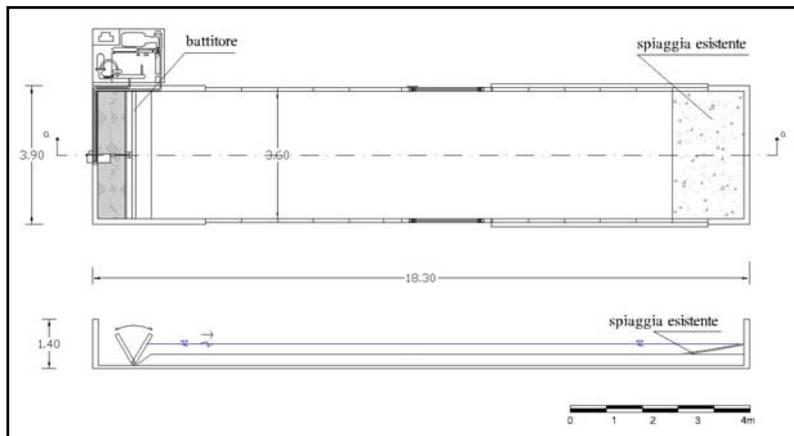


Figura 4.7 Planimetria e sezione longitudinale della vasca

Sul fondo della vasca è stato riprodotto il profilo di spiaggia rilevato nel corso delle indagini di campo di cui si disponevano i dati. In particolare è stata assunta come batimetria iniziale quella relativa all'anno di realizzazione dell'intervento di protezione costiera del litorale ossia al 2006.

Al di sopra della vasca sono posti una passerella di ferro ed un ponte mobile grazie ai quali è possibile ubicare e spostare gli strumenti di misura da utilizzare.

La strumentazione adottata è costituita da una serie di sonde resistive, un micro-ADV, un laser scanner, un generatore di luce laser, una macchina fotografica ed una telecamera stereoscopica, utili per una caratterizzazione relativamente completa dell'idrodinamica e della morfodinamica del modello.

Il moto ondoso è generato dal movimento oscillatorio di un battitore di tipo a ventola, incernierato al fondo della vasca, il cui movimento si realizza grazie ad un sistema oleodinamico con controllo elettronico posto lateralmente alla vasca. Il sistema permette di realizzare sia onde regolari che irregolari ed è necessaria una indagine preliminare di taratura, in presenza della batimetria riprodotta in vasca, al fine di ottenere i valori di altezza e periodo d'onda voluti al variare dei parametri di input da fornire al generatore.

4.3.2 Strumenti di misura

La caratterizzazione dell'idrodinamica nella vasca è effettuata mediante la misura della sopraelevazione del pelo libero e di profili di velocità in specifiche posizioni del modello.

L'onda generata dal battitore viene acquisita da un'apparecchiatura di misura costituita da più sonde di livello di tipo resistivo "Wave" (Figura 4.8), costituite da due fili metallici in acciaio inossidabile, dotate di una scheda di acquisizione analogico-digitale, e da un software gestionale capace di rilevare le ampiezze di oscillazione del pelo libero, attraverso una legge di proporzionalità tra tensione ed elevazione η , ricavata da taratura precedente all'avvio del singolo esperimento. Sono state usate 4 sonde: due poste offshore rispetto alla barriera sommersa e due in corrispondenza della spiaggia. In tal modo è stato possibile ricavare i valori di altezza d'onda incidente e riflessa, attraverso il metodo delle due sonde di Goda e Suzuki (1976), descritto in appendice A, al fine di ottenere una stima della riflessione generata in vasca.

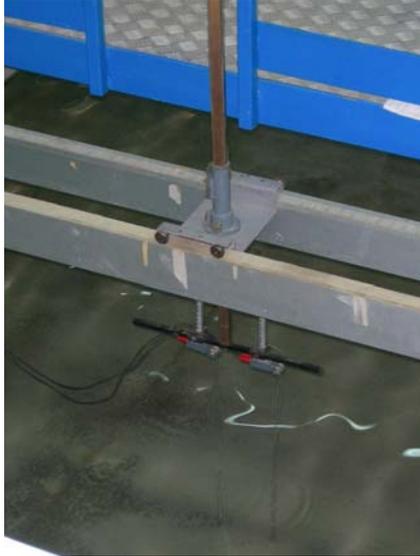


Figura 4.8 Sonde resistive

Per la misura della velocità è stato utilizzato un micro-ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) prodotto dalla SONTEK del tipo down-looking posizionato a circa 1 m della barriera soffolta, lato offshore (Figura 4.9).



Figura 4.9 Profilatore di velocità ADV

La Figura 4.10 riporta il posizionamento all'interno della vasca di sperimentazione delle sonde resistive utilizzate e del misuratore acustico di velocità.

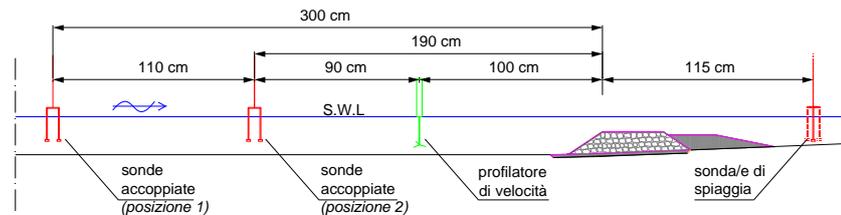


Figura 4.10 Schema del posizionamento in vasca delle sonde resistive e del micro ADV

L'evoluzione morfologica del fondale sabbioso e della struttura soffolta è stata misurata sia mediante tecniche tradizionali, ovvero picchetti graduati ogni centimetro infissi nello strato di sabbia (Figura 4.11), sia con tecniche ottiche avanzate. In particolare, sono stati utilizzati un laser scanner tridimensionale prodotto dalla ditta Leica Geosystem, una telecamera stereoscopica prodotta dalla ditta Videre Design (Figura 4.12) ed una tecnica per la ricostruzione bidimensionale delle superfici basata sulle metodologie tipiche della computer vision sviluppata presso l'Università di Catania (Faraci et al. 2000). Tale tecnica parte dall'acquisizione di una immagine dell'oggetto della misura illuminato da una opportuna sorgente di luce che permette di definirne i contorni, nel caso specifico una luce laser trasformata in un piano di luce da una lente cilindrica. Successivamente tale immagine va interpretata per estrapolare informazioni metriche attraverso una procedura di calibrazione (Figura 4.13).



Figura 4.11 Picchetti graduati sulla spiaggia



Figura 4.12 Videocamera stereoscopica (Videre Design)



Figura 4.13 Immagine del laser adottato ed esempio di foto utilizzata per la calibrazione

4.3.3 Realizzazione del modello fisico

Dalle considerazioni effettuate sul sito prototipo di Calabaia, Belvedere Marittimo (CS), condotte dai ricercatori del DICA dell'Università di Catania, il modello è stato realizzato in scala geometrica 1:30.

Il moto ondoso a scala di modello è stato riprodotto utilizzando la scala di Froude, usualmente utilizzata nella modellazione della propagazione di onde di gravità, quali sono quelle di mare.

Per la realizzazione del modello, sono stati utilizzati i seguenti materiali lapidei:

- basalto per la costruzione della barriera soffolta;
- sabbia del Ticino per lo strato filtro e il tappetino di posa della barriera;
- sabbia da 0.25mm per riprodurre il sedimento utilizzato per l'opera di ripascimento;
- ghiaietto da 3cm in marmo per il sottofondo del modello fisico.

In Tabella 4.3 sono riportati i diametri ed i volumi utilizzati dei materiali sopracitati.

Tabella 4.3 Volumi e diametri dei materiali utilizzati

| Materiale | D _{min} (mm) | D _{max} (mm) | D ₅₀ (mm) | Volume (m ³) |
|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| Basalto | 20 | 30 | - | 0.20 |
| Sabbia filtro | 3 | 5 | - | 0.13 |
| Sabbia fondale | - | - | 0.25 | 1.59 |
| Ghiaietto | - | - | 30 | 1.27 |

Per quanto concerne la morfologia di spiaggia, il profilo iniziale, considerato per il modello fisico è quello ottenuto dal rilievo batimetrico del 2006, precedentemente descritto, lungo la sezione 29.

4.4 MODELLAZIONE FISICA

4.4.1 Esperimenti condotti

Il fine della modellazione fisica era lo studio dell'evoluzione morfologica del fondale sabbioso, durante la campagna sperimentale sono state condotte due serie di esperimenti su due diversi modelli fisici:

- a) intervento di ripascimento protetto nella configurazione di progetto, così come realizzato in situ (configurazione originale);
- b) intervento di ripascimento protetto, modificato rispetto al caso precedente al fine di proteggere lo strato di filtro dall'erosione, tramite la realizzazione di una mantellata superficiale con massi di 2° categoria (configurazione "corazzata").

Allo scopo della validazione del modello numerico realizzato in FLOW-3D (di cui si dirà nel capitolo 5) sono stati seguiti personalmente gli esperimenti realizzati nella configurazione originale considerando le seguenti condizioni ondose:

- evoluzione del profilo di spiaggia soggetto ad un moto ondoso irregolare (spettro Jonswap) con $H_s=1.49\text{cm}$ e $T_p=8.00\text{s}$, per una durata equivalente a 4 anni (intervallo di tempo in cui si dispone di rilievi in situ).
- evoluzione del profilo di spiaggia per effetto dell'attacco di un'onda regolare per una durata equivalente di due anni (660minuti).

Questo secondo caso (onda regolare) è stato il test case fondamentale su cui si è effettuato lo studio numerico.

4.4.2 Risultati modellazione fisica

Si riportano in questo paragrafo solo i risultati relativi alle caratteristiche idrodinamiche dei test realizzati e non della morfodinamica, aspetto curato dai ricercatori dell'unità dell'Università di Catania. L'idrodinamica del moto ondoso (periodo medio T_m , e altezza d'onda significativa H) è stata rilevata mediante due sonde resistive poste di fronte alla barriera (indicandone i valori con $H1$ e $H2$) ed una sulla spiaggia a tergo di quest'ultima (indicando con $H3$).

Nella Tabella 4.4 vengono sintetizzate le caratteristiche idrodinamiche riferite alle sonde disposte come in Figura 4.14.

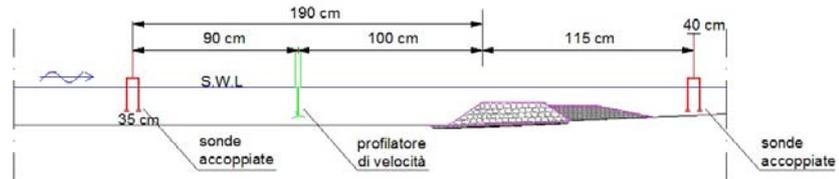


Figura 4.14 Schema sonde per esperimenti con onda regolare

Tabella 4.4 Caratteristiche idrodinamiche delle onde regolari (Configurazione originale)

| Test | t (min) | T_m (s) | H_1 (cm) | H_2 (cm) | H_3 (cm) |
|------|------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| OR11 | 60 | 1.41 | 5.29 | 5.16 | 2.73 |
| OR12 | 120 | 1.40 | 5.33 | 5.64 | 2.84 |
| OR13 | 180 | 1.15 | 5.26 | 5.19 | 2.42 |
| OR14 | 240 | 1.41 | 5.08 | 4.52 | 2.85 |
| OR15 | 330 | 1.44 | 5.74 | 5.58 | 4.55 |
| OR21 | 390 | 1.42 | 5.45 | 5.81 | 3.45 |
| OR22 | 450 | 1.42 | 5.34 | 4.73 | 3.30 |
| OR23 | 510 | 1.43 | 4.94 | 5.41 | 2.68 |
| OR24 | 570 | 1.44 | 4.77 | 4.94 | 3.27 |
| OR25 | 660 | 1.43 | 5.57 | 5.65 | 2.72 |

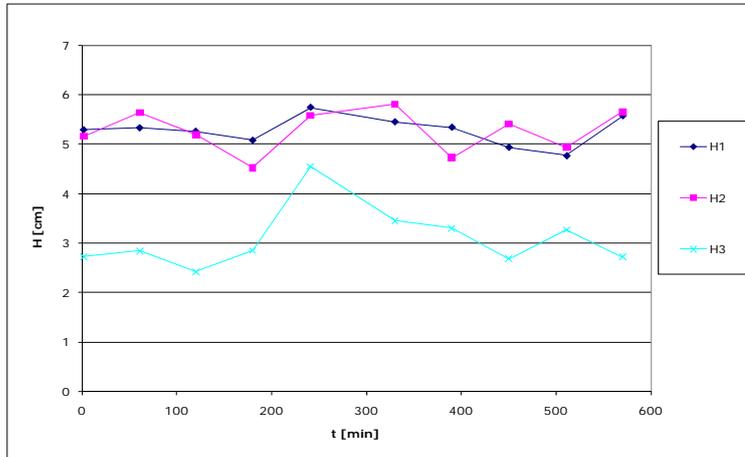


Figura 4.15 Variazione nel tempo delle altezze d'onda significativa in regime di onda morfologica regolare ($0 \text{ min} < t < 660 \text{ min}$, ovvero 2 anni a scala di prototipo)

4.4.3 Riflessione e trasmissione del moto ondoso

In Figura 4.16 e in Figura 4.17 sono riportati rispettivamente i coefficienti di riflessione K_r e di trasmissione K_t rilevati durante le prove sperimentali condotte in condizione di onda regolare. Il coefficiente di riflessione risulta estremamente variabile variando da 0.16 a 0.30. Per quanto riguarda i coefficienti di trasmissione, essi risultano compresi tra 0.48 e 0.54.

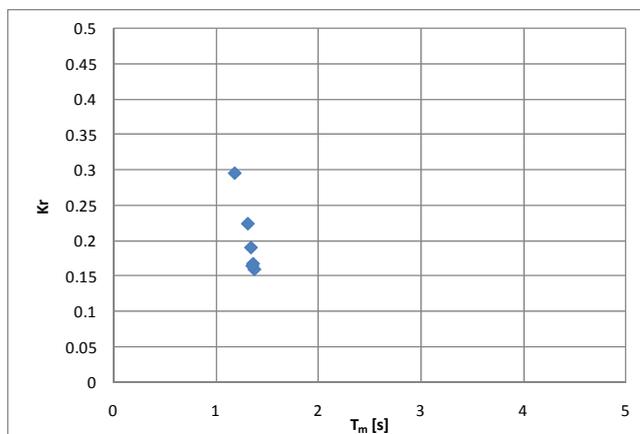


Figura 4.16 Coefficienti di riflessione al variare del periodo medio, ottenuti sul modello fisico della configurazione originale in condizioni di onda regolare (DICA, Uni. Catania)

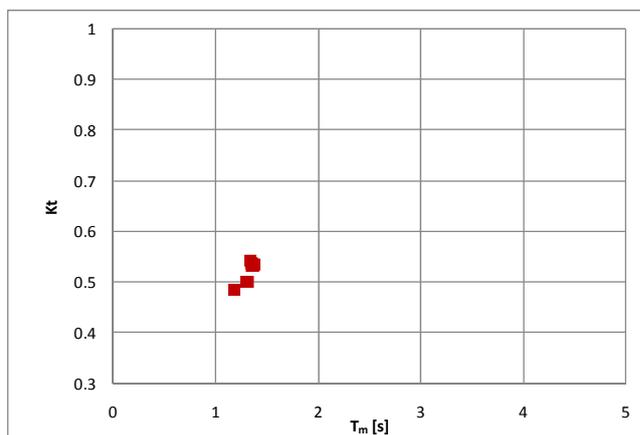


Figura 4.17 Coefficienti di trasmissione al variare del periodo medio, ottenuti sul modello fisico della configurazione originale in condizioni di onda morfologica regolare (DICA, Uni. Catania)

Tali risultati saranno ripresi nel capitolo 5 relativo alla modellazione numerica, argomento principale del presente lavoro di tesi.

5 MODELLAZIONE NUMERICA DEL CASO STUDIO DELLA SPIAGGIA DI CALABAIA DI BELVEDERE MARITTIMO (CS)

5.1 CARATTERISTICHE BARRIERA E DOMINIO DI CALCOLO

Per l'analisi numerica dell'interazione moto ondoso e barriera sommersa, si è proceduto come per la modellazione fisica realizzata all'Università di Catania (UniCt) (cfr. Capitolo 4), riproducendo la situazione reale della spiaggia di Calabaia in Belvedere Marittimo (CS) con un modello bidimensionale in scala 1:30. A differenza della modellazione fisica qui si è usato un fondo fisso, riproducendo il profilo di spiaggia con barriera che è stato utilizzando a Catania come profilo iniziale.

E' ben noto che la modellazione RANS/VOF permette di simulare anche questo tipo di fenomeni, tuttavia si è scelto di non rappresentare il fondo mobile per non aggiungere ulteriori complessità al problema. La dimensione longitudinale del canale numerico è paragonabile a quella del canale dell'UniCt misurando in questo caso 16.90m (asse X) mentre l'altezza della mesh di calcolo è pari a 0.55m (asse Z) (Figura 5.1).



Figura 5.1 Schema del canale numerico

La generazione del moto ondoso avviene alla prima fila di celle del dominio di calcolo (lato sinistro in figura). Subito dopo la generazione è presente un fondo piano orizzontale lungo 6.90m prima dell'inizio della spiaggia, l'altezza d'acqua in quiete su tale fondo è pari a 30cm.

La barriera è posta a 14.5m dall'inizio del dominio di calcolo e presenta una sommergenza pari a 8.3cm ($R_c=8.3\text{cm}$), con una profondità di imbasamento pari a 18cm ($d_{\text{imb}}=18\text{cm}$), una pendenza del paramento lato offshore pari a 0.675 ($\alpha_{\text{off}}=\tan 34^\circ$) e una larghezza in cresta (Freebord) pari a 33cm ($B=33\text{cm}$).

La profondità invece sul fondo piatto subito prima della barriera è pari a 23.6cm (Figura 5.2).

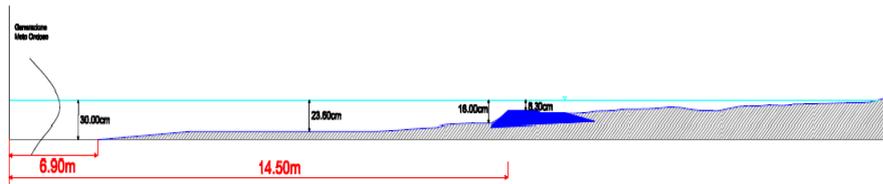


Figura 5.2 Profilo riprodotto per le simulazioni numeriche

5.2 ANALISI DI SENSIBILITÀ DELLA GRIGLIA

Per poter definire le dimensioni ottimali della griglia di calcolo, al fine di ottenere una simulazione corretta nel rispetto di tempi di elaborazione accettabili, è stata effettuata un'analisi di sensibilità utilizzando diverse soluzioni di discretizzazione spaziale. Si è operato solo su quella spaziale perché il passo temporale di calcolo Δt è vincolato da condizioni di Courant. Inoltre, nel caso di problemi a superficie libera, il passo temporale di calcolo è limitato in modo da non permettere al fluido di attraversare più di una cella durante esso (i criteri che Δt di calcolo deve verificare dipendono dalla velocità, dall'accelerazione e dal grado di riempimento della cella).

Quello che ovviamente si può variare è l'intervallo Δt di output dei risultati, che è stato fissato pari a 0.1s, ottenendo così da 11 a 30 punti circa ad onda a seconda dei periodi dei moti ondosi simulati.

Si presentano i risultati relativi all'analisi effettuata per la simulazione denominata OR14_bar, avente come target del moto ondoso generato $H=4.58\text{cm}$ e $T=1.34\text{s}$, con lunghezza d'onda al largo pari a 2.04m.

Il target dell'onda che si vuole nel canale non è quello che si ottiene nella realtà, da qui la necessità di caratterizzare ogni simulazione con parametri sintetici registrati all'interno del canale numerico stesso.

La prima griglia di calcolo utilizzata (mesh1) è di tipo quadrato con celle di dimensione 5mmx5mm nelle direzioni X e Z, la cui scelta è derivata dalle indicazioni e suggerimenti riportati in letteratura (Monaco, 2010; Dentale et al., 2010). Considerando la lunghezza d'onda al largo per il periodo considerato si ottiene così un numero di punti per onda pari a circa 400 lungo l'asse X. I punti lungo l'asse X sono più che sufficienti per le simulazioni da realizzare, resta da indagare la direzione Z, la verticale. A tal fine la griglia da celle quadrate uniformi è stata modificata in celle rettangolari andando a diminuire la dimensione verticale, utilizzando quindi celle di dimensioni 5x2mm (mesh2) e 5x1mm (mesh3) (cfr. Tabella 5.1). Nel seguito sono riportate le immagini delle griglie di calcolo e dei grafici con l'andamento delle Eta nel tempo all'ascissa 1m dal generatore (cfr. Figura 5.4) ed il confronto dei valori calcolati per la griglia con ΔZ pari a 2mm e 5mm rispetto a quella con ΔZ di 1mm (cfr. Figura 5.5). Come si può notare gli scostamenti sono praticamente irrilevanti già considerando quella con ΔZ 5mm rispetto a quella con ΔZ 1mm. Il risparmio di tempo di calcolo è notevole: una simulazione

completa della durata di 150s con celle uniformi di 5mmx5mm necessita di circa 24h di elaborazione mentre nel doppio del tempo (circa 48 ore) si riescono ad ottenere appena 4s della simulazione con ΔZ 1mm. Per tali considerazioni è stata adottata per tutti i calcoli effettuati la griglia a celle quadrate di dimensione 5x5mm con un numero totale di celle pari a 360800.

Tabella 5.1 Geometria delle mesh di calcolo

| | | dim. (m) | n. celle | delta (mm) | n. celle tot |
|-------|---|-------------|----------|---------------|-----------------|
| mesh1 | Z | 0.55 | 110 | 5 | 360800 |
| | X | 16.4 | 3280 | 5 | |
| mesh2 | Z | 0.55 | 275 | 2 | 902000 |
| | X | 16.4 | 3280 | 5 | |
| mesh3 | Z | 0.55 | 550 | 1 | 1804000 |
| | X | 16.4 | 3280 | 5 | |

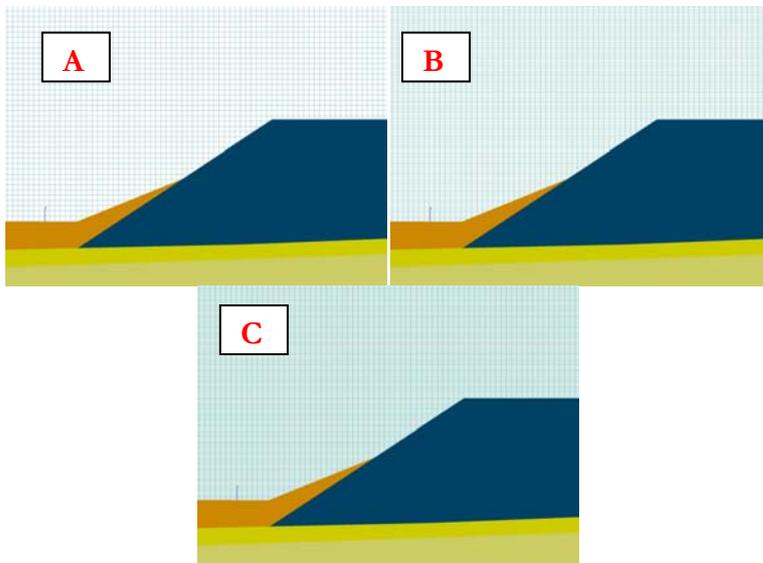


Figura 5.3 Particolare delle mesh di calcolo (A_mesh1, B_mesh2, C_mesh3)

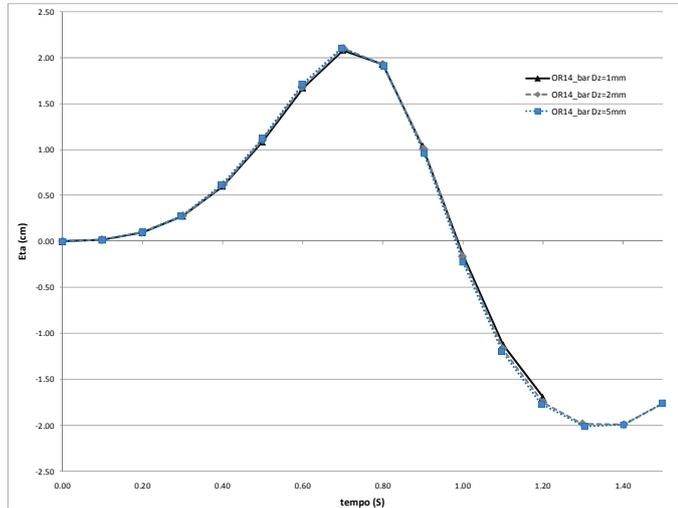


Figura 5.4 Andamento delle Eta nel tempo all'ascissa X=1m per le 3 mesh di calcolo usate.

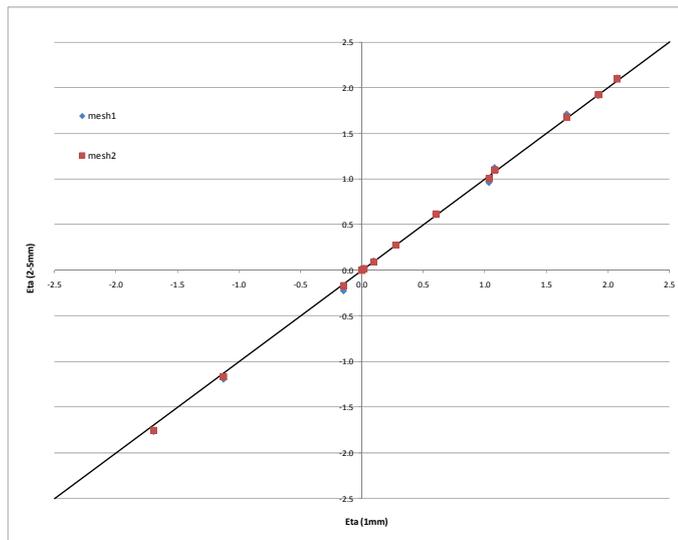


Figura 5.5 Scostamenti delle Eta tra le 3 mesh di calcolo

Ulteriori verifiche di questo tipo sono state condotte nel corso del lavoro per assicurare la correttezza di risultati, ma non vengono qui riportate per brevità.

5.3 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche effettuate ha permesso la valutazione degli effetti della barriera soffolta sulla riflessione e sulla trasmissione del moto ondoso cui è stata sottoposta.

In particolare sono stati determinati i coefficienti di riflessione per ogni simulazione mediante il metodo di separazione dell'onda incidente e di quella riflessa basato sull'algoritmo di Goda e Suzuki (1976). Il metodo opera nel dominio delle frequenze e necessita della misura del segnale in due posizioni diverse per effettuare la separazione tra le componenti (cfr. allegato A).

E' stata fissata la posizione nel canale numerico delle due sonde basandosi sull'esperienza della modellazione fisica (descritta nel capitolo 4) al fine di poter effettuare un confronto. Tuttavia, per la modellazione numerica è più agevole svolgere verifiche e confronti: si hanno a disposizione le storie temporali dell'oscillazione della superficie libera nel canale per ogni ascissa della griglia di calcolo, in pratica con un passo pari al Δx impostato per la discretizzazione del dominio. Questo ha permesso di verificare la consistenza dei valori calcolati delle altezze incidenti e riflesse, nonché dei coefficienti di riflessione, al variare della distanza tra le sonde considerata, sempre mantenuta nel rispetto dei limiti suggeriti da Goda e Suzuki, per evitare singolarità nell'algoritmo di separazione (per valori prossimi a multipli interi di una semilunghezza d'onda, ovvero $0.05 < \Delta l / L < 0.45$).

5.3.1 Sensibilità della riflessione al variare di ΔL

Come accennato in precedenza, è stata condotta un'analisi di sensibilità al fine di verificare la consistenza dei valori dei coefficienti di riflessione valutati utilizzando le sonde accoppiate poste nella stessa posizione della modellazione fisica dell'Università di Catania, di cui è detto nel relativo capitolo. In quest'ultima l'asse delle due sonde è stato posto ad una distanza di 190cm dalla barriera dal lato dell'ondogeno, il Δl tra le due era di 35cm. Le stesse posizioni all'interno del dominio di calcolo numerico implementato per questo lavoro corrispondono alle ascisse $X_1=9.275\text{m}$ e $X_2=9.625\text{m}$, con l'asse delle due posto a $X=9.45\text{m}$. L'algoritmo di Goda e Suzuki, per le spiegazioni fornite in Appendice A, limitano la distanza Δl tra le due sonde nel range $0.05L$ e $0.45L$, con L lunghezza d'onda.

L'analisi è stata condotta fissando la posizione dell'asse delle due sonde in $X=9.45\text{m}$ e considerando le ascisse a destra e a sinistra di esso in posizioni tali da incrementare via via il Δl .

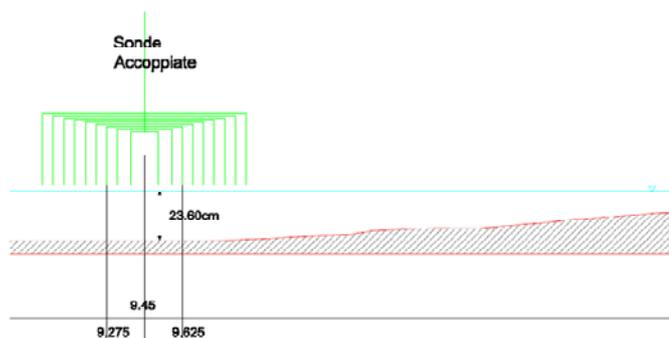


Figura 5.6 Posizione sonde per analisi sensibilità per la riflessione

Si riportano qui le analisi condotte per due delle simulazioni realizzate, quelle denominate OR15_D_bar e OR15_F_bar, con periodi del moto ondoso regolare incidente pari, rispettivamente a 3.07s e 1.57s . Per le due simulazioni appena menzionate si riportano le ascisse considerate con i relativi valori di Δl e dei coefficienti di riflessioni calcolati con il metodo descritto (cfr. Tabella 5.2 e Tabella 5.3).

Tabella 5.2 Risultati analisi sensibilità riflessione (OR15_F_bar)

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | C (m/s) | L (m) | d/L | Durata Sim. (s) |
|------------|---------------------|--------------------|--------------|------------|-------|-----------------------|
| OR15_F_bar | 4.41 | 1.57 | 1.57 | 2.47 | 0.12 | 150 |

| $\Delta l/L$ | Δl (m) | X_{media} (m) | X_1 (m) | X_2 (m) | K_r | H_{si} (cm) | H_{sr} (cm) |
|----------------|-------------------|--------------------|--------------|--------------|------------------------|------------------|------------------|
| | | 9.45 | | | | | |
| 0.05 | 0.12 | | 9.388 | 9.512 | 0.226 | 5.504 | 1.243 |
| 0.10 | 0.25 | | 9.325 | 9.575 | 0.243 | 5.586 | 1.357 |
| 0.14 | 0.35 | | 9.275 | 9.625 | 0.286 | 5.617 | 1.606 |
| 0.18 | 0.45 | | 9.225 | 9.675 | 0.257 | 5.655 | 1.453 |
| 0.22 | 0.55 | | 9.175 | 9.725 | 0.227 | 5.756 | 1.305 |
| 0.26 | 0.65 | | 9.125 | 9.775 | 0.229 | 5.774 | 1.321 |
| 0.30 | 0.75 | | 9.075 | 9.825 | 0.233 | 5.708 | 1.332 |
| 0.34 | 0.85 | | 9.025 | 9.875 | 0.249 | 5.571 | 1.388 |
| 0.38 | 0.95 | | 8.975 | 9.925 | 0.264 | 5.329 | 1.407 |
| K_{r_medio} | 0.246 | | | | RMSE K_{r_medio} | | |
| K_{r_UniCt} | 0.286 | | | | RMSE K_{r_UniCt} | | |

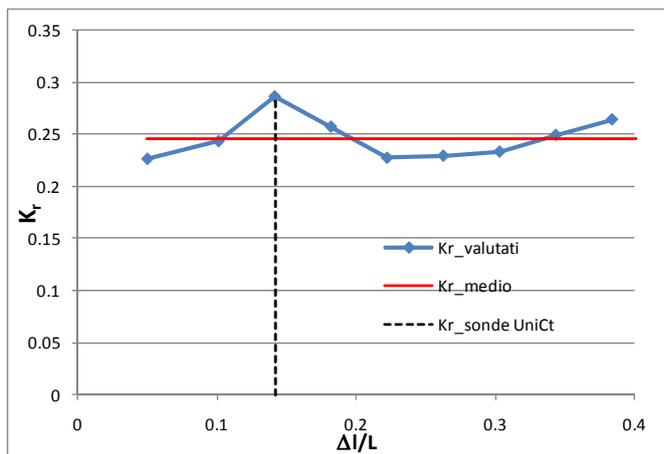


Figura 5.7 Analisi di sensibilità K_r al variare del rapporto $\Delta l/L$ (OR15_F_bar)

Tabella 5.3 Risultati analisi sensibilità riflessione (OR15_D_bar)

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | C (m/s) | L (m) | d/L | Durata sim. (s) |
|----------------|---------------------|------------------------|------------|--------------|-------------|-----------------------|
| OR15_D_bar | 4.41 | 3.07 | 1.68 | 5.15 | 0.06 | 150 |
| | Xmedia (m) | | 9.45 | | | |
| $\Delta l/L$ | Δl (m) | X1 (m) | X2 (m) | K_r | Hsi (cm) | Hsr (cm) |
| 0.05 | 0.26 | 9.321 | 9.579 | 0.207 | 5.504 | 1.243 |
| 0.07 | 0.35 | 9.275 | 9.625 | 0.213 | 5.901 | 1.257 |
| 0.09 | 0.45 | 9.225 | 9.675 | 0.203 | 5.586 | 1.357 |
| 0.13 | 0.65 | 9.125 | 9.775 | 0.200 | 5.617 | 1.606 |
| 0.16 | 0.85 | 9.025 | 9.875 | 0.257 | 5.655 | 1.453 |
| 0.20 | 1.05 | 8.925 | 9.975 | 0.211 | 5.756 | 1.305 |
| 0.24 | 1.25 | 8.825 | 10.075 | 0.217 | 5.774 | 1.321 |
| 0.28 | 1.45 | 8.725 | 10.175 | 0.234 | 5.708 | 1.332 |
| 0.32 | 1.65 | 8.625 | 10.275 | 0.259 | 5.571 | 1.388 |
| 0.36 | 1.85 | 8.525 | 10.375 | 0.209 | 5.887 | 1.230 |
| K_{r_medio} | 0.222 | RMSE K_{r_medio} | | 2.1% | | |
| K_{r_UniCt} | 0.213 | RMSE K_{r_UniCt} | | 2.3% | | |

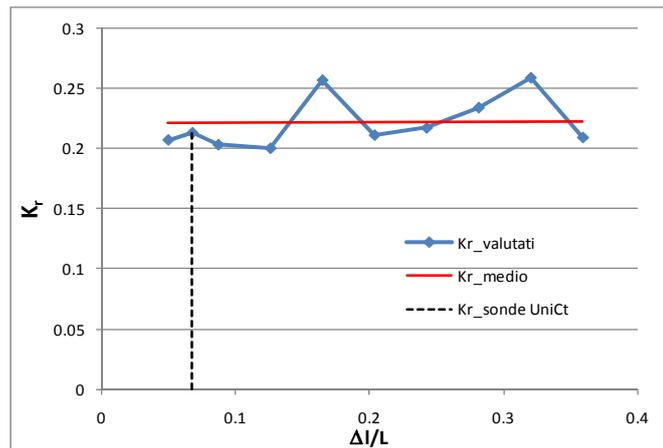


Figura 5.8 Analisi di sensibilità K_r al variare del rapporto $\Delta l/L$ (OR15_D_bar)

Lo scarto dei valori è stato valutato rispetto alla media dei coefficienti e rispetto al valore ricavato con le sonde poste nelle stesse posizioni di Catania (indicato nelle tabelle come K_{r_UniCt}). Per quest'ultima situazione lo scarto è in entrambi i casi maggiore di quello rispetto al valore medio, rispettivamente 3.9% e 2.3% contro 1.9% e 2.1%. Dato che calcolare un coefficiente di riflessione come media di tutti quelli ricavati al variare delle ascisse considerate sarebbe diventato molto oneroso, ed avendo ritenuto lo scarto comunque accettabile, si è deciso di valutare il K_r utilizzando le sole ascisse $X_1=9.275m$ e $X_2=9.625m$ per tutte le simulazioni effettuate

La prima fase dell'analisi dei dati è stata volta alla determinazione, per ogni simulazione, dei parametri caratterizzanti il moto ondoso che si instaura nel canale numerico, a valle del generatore interno implementato nel software. Tale generatore prevede di fornire in input, per generare l'onda regolare, il valore del periodo e della semiampiezza d'onda, nonché l'altezza d'acqua su cui l'onda viene generata. Lungo le celle di confine, o meglio di ingresso dell'onda nel dominio di calcolo, per ogni istante di tempo della simulazione il codice impone l'altezza d'acqua istantanea η , e le componenti orizzontali e verticali della velocità calcolate secondo le relazioni della teoria di Airy, facendo sì che l'onda entri nel dominio già completamente sviluppata (cfr. paragrafo 2.8.3).

Naturalmente, come è prassi nella modellazione fisica, il target dell'onda che si vuole nel canale non è quello che si ottiene nella realtà, da qui la necessità di caratterizzare ogni simulazione con parametri sintetici registrati all'interno del canale numerico stesso.

Sono stati valutati i valori delle altezze significative (H_s), delle altezze di momento zero (H_{m0}), del periodo medio (T_m) per le ascisse considerate. L'analisi è stata fatta utilizzando il metodo dello Zero-Up Crossing sulla serie temporale dell'oscillazione della superficie libera per ogni ascissa, depurando il segnale della parte iniziale di transitorio, permettendo quindi al moto ondoso di stabilizzarsi nel canale numerico.

I parametri sono stati calcolati per un'ascissa posta ad un metro dalla prima cella del dominio di calcolo, quella in cui avviene la generazione del moto ondoso, ed in quattro ascisse successive corrispondenti alle posizioni delle sonde delle prove fisiche realizzate in vasca all'Università di Catania.

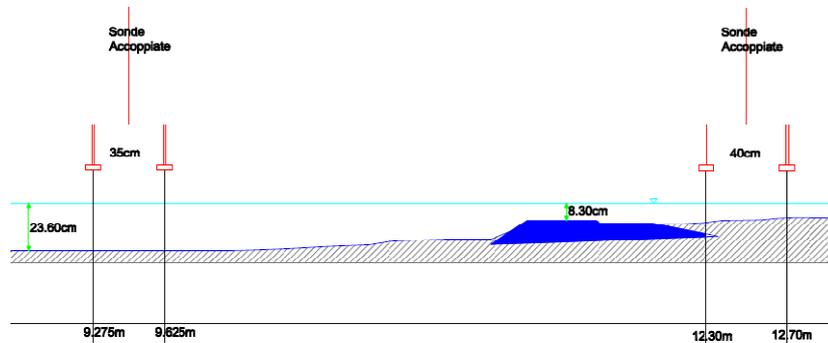


Figura 5.9 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione

La Tabella 5.4 contiene i dati delle simulazioni effettuate con le onde regolari, sono riportati i valori delle altezze e dei periodi d'onda impostati al generatore, le durate delle simulazioni, i valori di lunghezza d'onda e celerità. Il rapporto d/L per ogni simulazione è stato mantenuto nel range di acque intermedie ($1/25 < d/L < 1/5$) coerentemente con i test effettuati all'Università di Catania. Considerando la durata del segnale utilizzato per l'analisi ed i periodi del moto ondoso simulato, i parametri caratteristici sono stati calcolati avendo a disposizione un numero medio di onde che varia tra 30 ($T=3.47s$) e 60 ($T=1.18s$).

Tabella 5.4 Parametri delle simulazioni realizzate con onde regolari (presenza barriera)

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | C (m/s) | L (m) | d/L | Durata sim. (s) |
|------------|---------------------|--------------------|------------|----------|-------|-----------------------|
| OR11_bar | 4.35 | 1.31 | 1.51 | 1.98 | 0.15 | 150.00 |
| OR13_bar | 4.15 | 1.18 | 1.47 | 1.73 | 0.17 | 150.00 |
| OR14_bar | 4.59 | 1.34 | 1.52 | 2.04 | 0.15 | 140.00 |
| OR21_bar | 4.61 | 1.36 | 1.53 | 2.08 | 0.14 | 150.00 |
| OR24_bar | 4.47 | 1.35 | 1.53 | 2.06 | 0.15 | 150.00 |
| OR15_A_bar | 4.41 | 1.37 | 1.53 | 2.10 | 0.14 | 150.00 |
| OR15_B_bar | 4.41 | 1.07 | 1.41 | 1.51 | 0.20 | 150.00 |
| OR15_C_bar | 4.41 | 3.47 | 1.69 | 5.85 | 0.05 | 150.00 |
| OR15_D_bar | 4.41 | 3.07 | 1.68 | 5.15 | 0.06 | 150.00 |
| OR15_E_bar | 4.41 | 2.47 | 1.66 | 4.10 | 0.07 | 150.00 |

| | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|--------|
| OR15_F_bar | 4.41 | 1.57 | 1.57 | 2.47 | 0.12 | 150.00 |
| OR15_G_bar | 4.41 | 1.87 | 1.62 | 3.02 | 0.10 | 150.00 |
| OR15_H_bar | 4.41 | 2.07 | 1.63 | 3.38 | 0.09 | 150.00 |
| OR15_I_bar | 4.41 | 2.77 | 1.67 | 4.63 | 0.06 | 150.00 |

Nei grafici di seguito riportati è diagrammato l'andamento delle Eta (η , altezza istantanea d'acqua) in tre posizioni lungo la sezione (1.00m, 9.275m e 12.70m) per alcune delle simulazione riportate in tabella. La zona dell'ascissa 12.70m è a tergo della barriera, con una profondità del fondale pari a 7cm, è quella dei frangenti come si vede dal grafico relativo, in cui le onde sono trasformate perdendo la regolarità che le caratterizzava nella parte iniziale del canale.

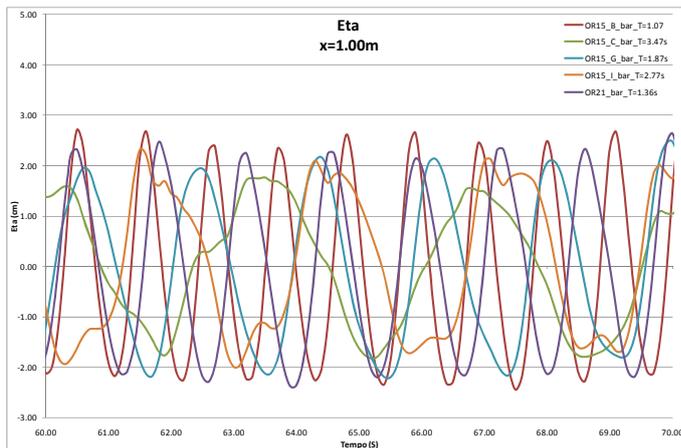


Figura 5.10 Confronto Eta, posizione x=1.00m

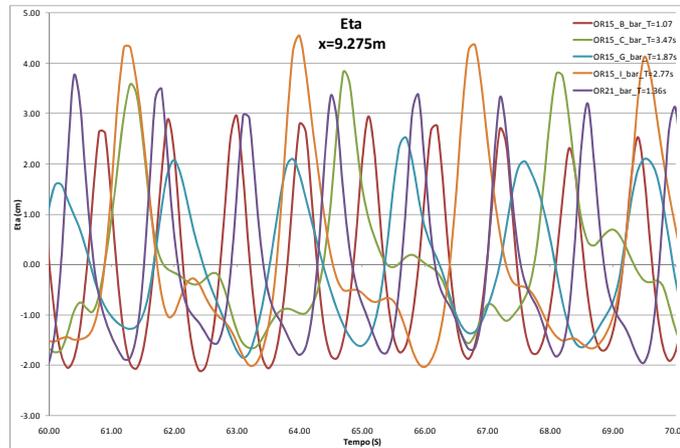


Figura 5.11 Confronto Eta, posizione x=9.275m

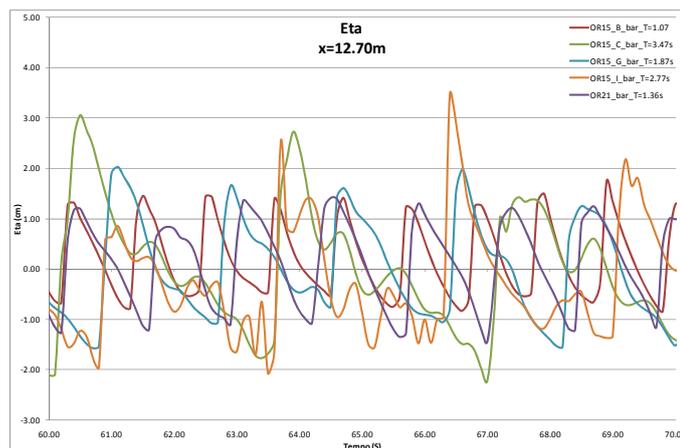


Figura 5.12 Confronto Eta, posizione x=12.70m

Nella Tabella 5.5, invece, sono riportati i valori dei parametri misurati per H_s , H_{m0} , T_m per ogni ascissa considerata (indicata con la distanza in metri dall'inizio del canale numerico). Si nota come il valore dei periodi misurati si conservi lungo il canale numerico e come restano consistenti rispetto a quello imposto in input al generatore ondoso del software; ciò non avviene per le altezze d'onda che assumono valori ben diversi da quelli che si vuole ottenere, cosa del resto ben nota anche nel campo della modellazione fisica.

Tabella 5.5 Caratteristiche moto ondoso simulato alle diverse ascisse (caso barriera)

| | H _s (cm) | H _{m0} (cm) | T (s) | H _s (cm) | H _{m0} (cm) | T (s) | H _s (cm) | H _{m0} (cm) | T (s) | H _s (cm) | H _{m0} (cm) | T (s) | H _s (cm) | H _{m0} (cm) | T (s) |
|------------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|----------------------|-------|---------------------|----------------------|-------|
| | x=1.00m | | | x=9.275m | | | x=9.625m | | | x=12.30m | | | x=12.70m | | |
| OR11_bar | 4.45 | 6.08 | 1.31 | 3.78 | 4.76 | 1.31 | 4.72 | 6.15 | 1.31 | 3.68 | 4.36 | 1.31 | 2.80 | 3.33 | 1.31 |
| OR13_bar | 4.33 | 5.85 | 1.18 | 4.10 | 5.25 | 1.18 | 4.74 | 6.30 | 1.18 | 3.45 | 4.37 | 1.18 | 2.51 | 3.09 | 1.18 |
| OR14_bar | 4.74 | 6.40 | 1.34 | 5.46 | 6.82 | 1.34 | 5.72 | 7.20 | 1.34 | 4.20 | 5.22 | 1.34 | 2.83 | 3.27 | 1.34 |
| OR21_bar | 4.66 | 6.40 | 1.36 | 5.34 | 6.54 | 1.36 | 5.39 | 6.85 | 1.36 | 4.32 | 5.32 | 1.36 | 2.86 | 3.39 | 1.36 |
| OR24_bar | 4.63 | 6.23 | 1.35 | 5.28 | 6.58 | 1.35 | 5.49 | 6.88 | 1.35 | 4.30 | 5.30 | 1.35 | 2.97 | 3.45 | 1.35 |
| OR15_A_bar | 4.48 | 6.13 | 1.37 | 4.84 | 6.06 | 1.37 | 4.80 | 6.22 | 1.37 | 4.39 | 5.38 | 1.37 | 2.84 | 3.46 | 1.37 |
| OR15_B_bar | 4.89 | 6.73 | 1.07 | 4.96 | 6.45 | 1.07 | 3.76 | 4.85 | 1.07 | 2.77 | 3.47 | 1.07 | 2.41 | 3.14 | 1.07 |
| OR15_C_bar | 3.82 | 4.79 | 3.46 | 5.59 | 5.60 | 3.01 | 5.03 | 5.07 | 2.44 | 6.04 | 5.61 | 3.35 | 4.66 | 4.82 | 2.41 |
| OR15_D_bar | 4.42 | 5.82 | 3.07 | 6.04 | 6.74 | 2.72 | 5.53 | 5.92 | 2.92 | 5.53 | 5.33 | 2.44 | 4.08 | 4.13 | 2.50 |
| OR15_E_bar | 3.76 | 4.69 | 2.47 | 4.18 | 5.20 | 2.47 | 3.24 | 3.75 | 2.42 | 5.63 | 5.46 | 2.47 | 7.36 | 7.16 | 2.47 |
| OR15_F_bar | 5.06 | 6.67 | 1.57 | 5.84 | 7.18 | 1.57 | 4.81 | 5.69 | 1.57 | 5.02 | 5.83 | 1.57 | 3.40 | 3.80 | 1.57 |
| OR15_G_bar | 4.34 | 5.87 | 1.87 | 3.86 | 4.90 | 1.87 | 4.41 | 5.43 | 1.87 | 4.16 | 4.64 | 1.87 | 3.53 | 4.07 | 1.87 |
| OR15_H_bar | 3.88 | 4.94 | 2.07 | 4.42 | 5.07 | 2.07 | 5.60 | 6.85 | 2.07 | 6.29 | 6.40 | 2.07 | 4.23 | 4.66 | 1.99 |
| OR15_I_bar | 4.53 | 5.79 | 2.77 | 6.61 | 7.41 | 2.77 | 6.13 | 6.49 | 2.43 | 5.67 | 5.64 | 2.70 | 3.72 | 3.92 | 1.69 |

5.3.2 Spettri

Come per lo studio presentato nel capitolo 3, anche in questo caso sono stati valutati gli spettri per ogni singola simulazione. Alcuni esempi di spettri ottenuti, relativi alla componente incidente e riflessa per ogni coppia di sonde, sono riportati di seguito comparati con i relativi segnali nel dominio del tempo. Per ogni caso mostrato l'unica variante delle simulazioni è il periodo dell'onda in quanto l'altezza impostata al generatore è mantenuta costante e pari a 4.41cm. Si nota come il picco dello spettro si trovi alla frequenza dominante del moto ondoso incidente che nel caso specifico, generando onde regolari, coincide proprio con il periodo dell'onda sinusoidale imposto al generatore. A partire dalla simulazione con periodo $T=1.57s$ a periodi man mano crescenti, si ritrova una dislocazione della potenza associata al moto ondoso su armoniche di frequenza multipla della fondamentale, nelle componenti incidenti e riflesse del segnale, sia per le sonde precedenti che a tergo della barriera, ciò in accordo con quanto discusso e ricavato in Ciardulli (2009).

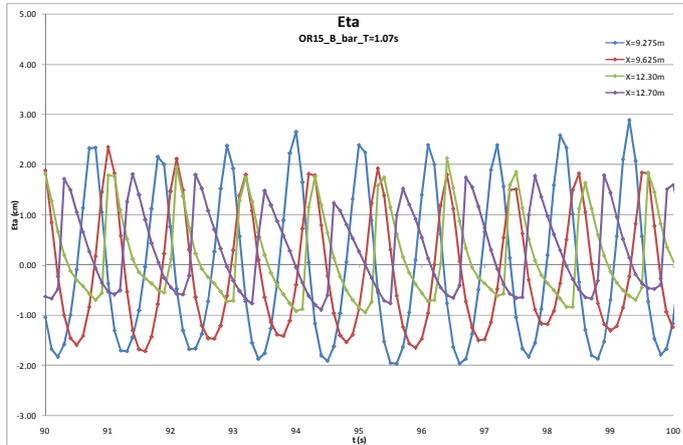


Figura 5.13 Andamento delle Eta (OR15_B_bar)

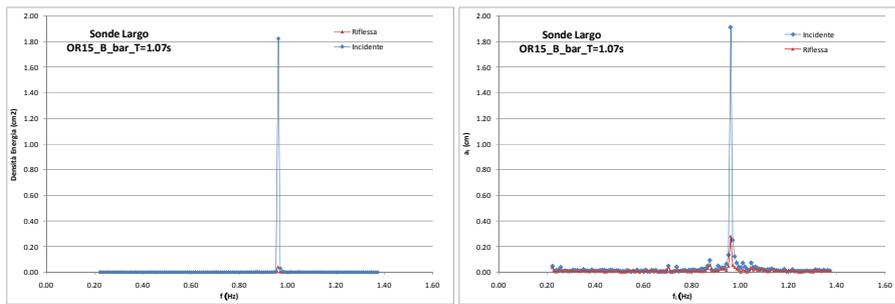


Figura 5.14 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_B_bar)

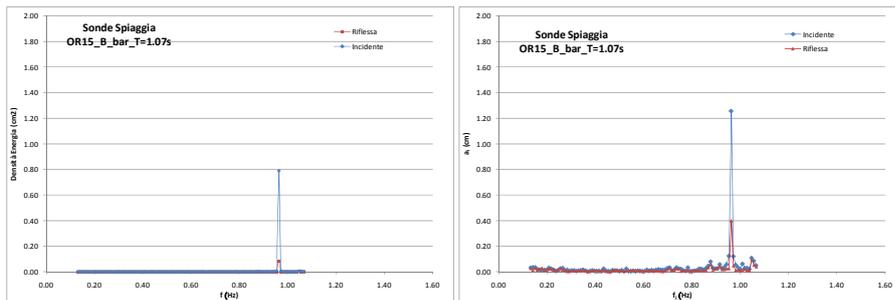


Figura 5.15 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_B_bar)

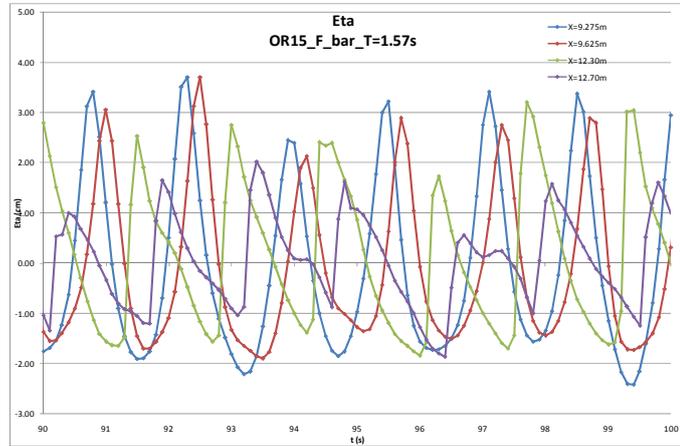


Figura 5.16 Andamento delle Eta (OR15_F_bar)

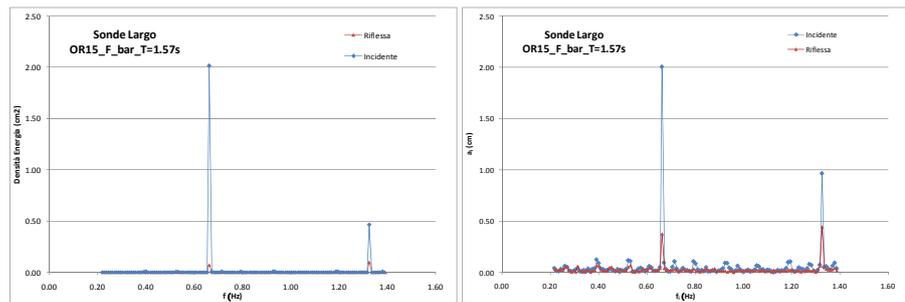


Figura 5.17 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_F_bar)

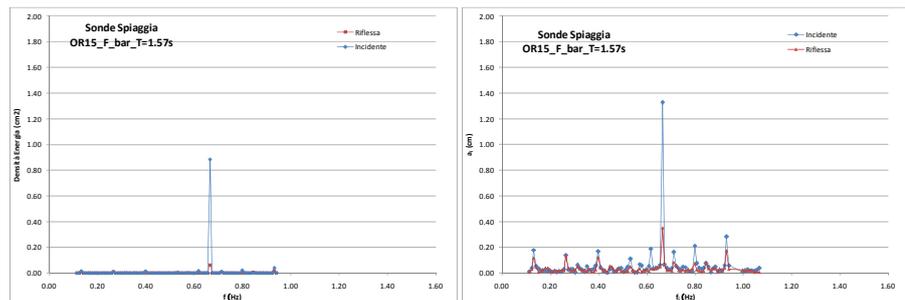


Figura 5.18 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_F_bar)

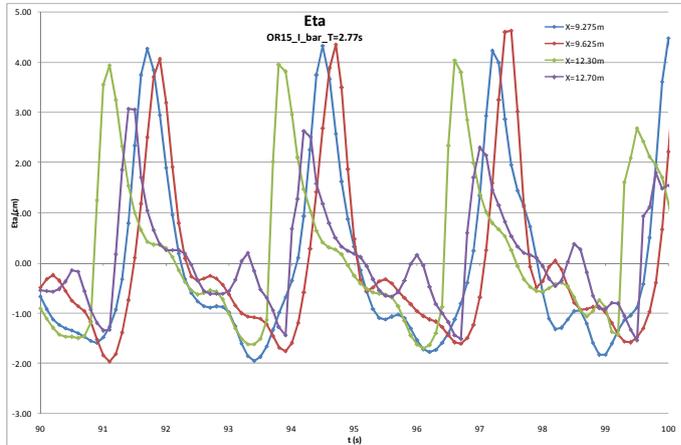


Figura 5.19 Andamento delle Eta (OR15_I_bar)

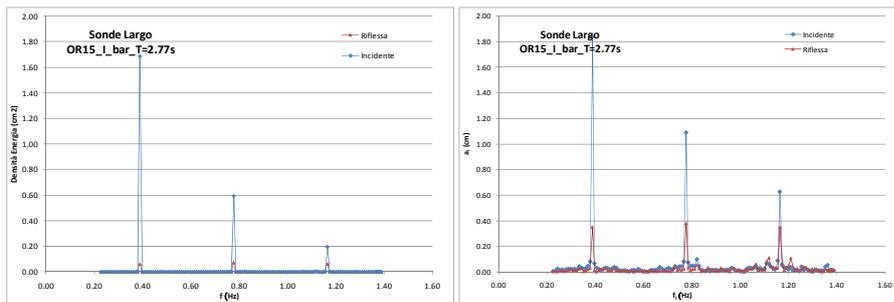


Figura 5.20 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_I_bar)

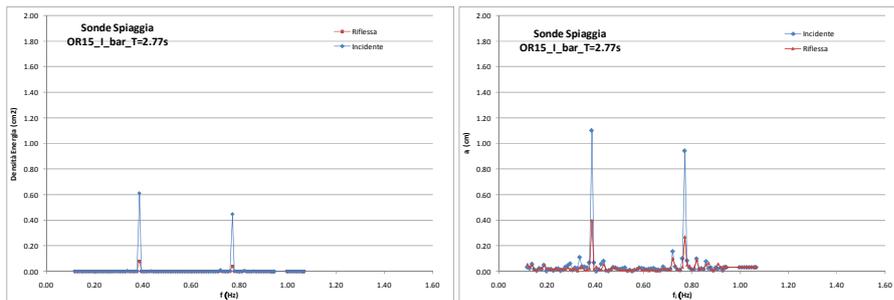


Figura 5.21 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_I_bar)

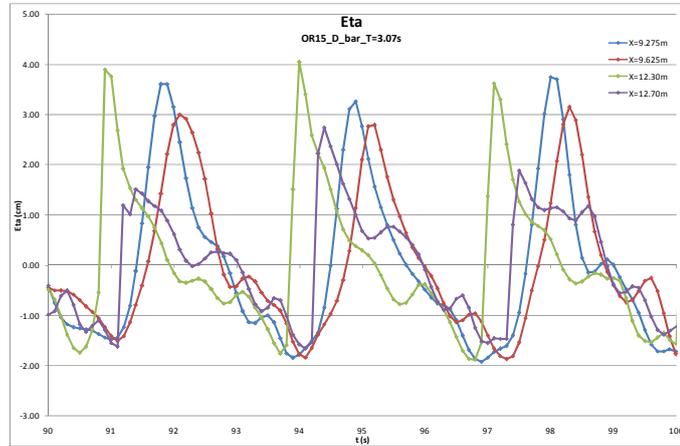


Figura 5.22 Andamento delle Eta (OR15_O_bar)

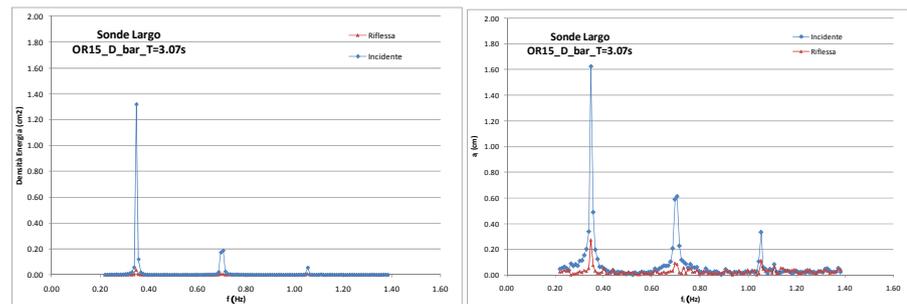


Figura 5.23 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde al largo (OR15_O_bar)

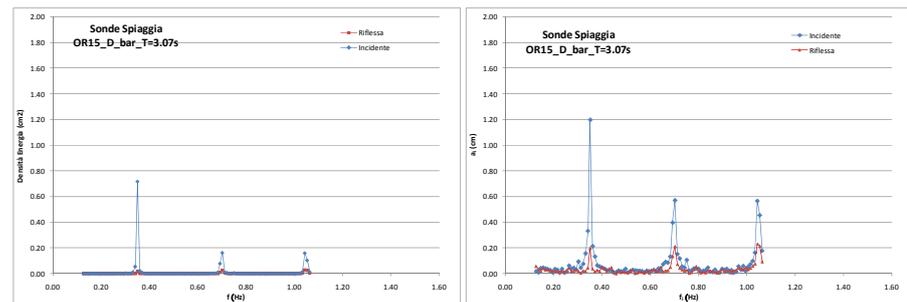


Figura 5.24 Spettro energia (a) e ampiezze (b) rilevati per le sonde spiaggia (OR15_O_bar)

5.3.3 Riflessione

Anche per questo studio è stata valutata la riflessione del moto ondoso generata dalla barriera sommersa una volta effettuata l'analisi spettrale sui segnali di Eta simulati nella vasca numerica. Per la procedura utilizzata si rimanda al paragrafo 3.4.

Per ogni simulazione è stato valutato il K_r per le sonde precedenti la barriera e a tergo di essa (vedi Figura 5.25). Si riportano in Tabella 5.6 i risultati ottenuti.

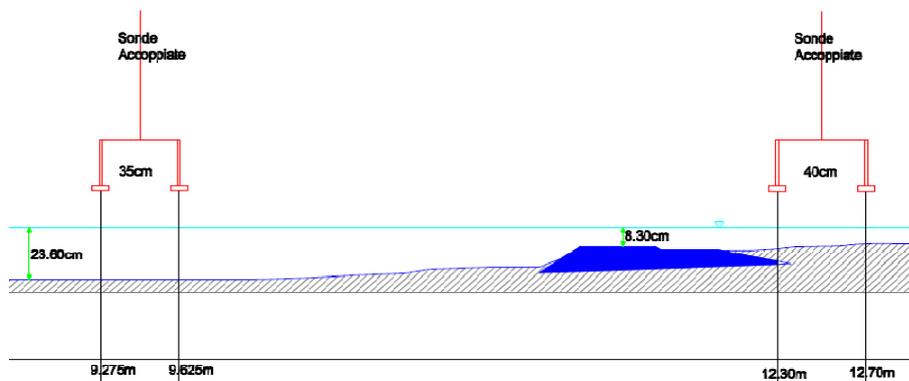


Figura 5.25 Posizione delle sonde numeriche per il calcolo della trasmissione e riflessione

Tabella 5.6 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_r simulati per le sonde barriera e spiaggia

| | H_{input} (cm) | T_{input} (s) | H_{Im0} $x=9.275m$ (cm) | K_{r1} | H_{si} (cm) | H_{sr} (cm) | H_{4m0} $x=12.70m$ (cm) | K_{r2} | H_{si} (cm) | H_{sr} (cm) |
|------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------------------------|--------------|------------------|------------------|
| | | | | largo | | | spiaggia | | | |
| OR11_bar | 4.35 | 1.31 | 4.76 | 0.253 | 3.70 | 0.90 | 3.33 | 0.352 | 3.50 | 1.20 |
| OR13_bar | 4.15 | 1.18 | 5.25 | 0.140 | 4.10 | 0.60 | 3.09 | 0.392 | 3.20 | 1.30 |
| OR14_bar | 4.59 | 1.34 | 6.82 | 0.196 | 5.40 | 1.00 | 3.27 | 0.374 | 3.90 | 1.50 |
| OR21_bar | 4.61 | 1.36 | 6.54 | 0.171 | 5.30 | 0.90 | 3.39 | 0.324 | 4.10 | 1.30 |
| OR24_bar | 4.47 | 1.35 | 6.58 | 0.184 | 5.20 | 1.00 | 3.45 | 0.347 | 4.10 | 1.40 |
| OR15_A_bar | 4.41 | 1.37 | 6.06 | 0.172 | 4.40 | 0.80 | 3.46 | 0.306 | 4.20 | 1.30 |
| OR15_B_bar | 4.41 | 1.07 | 6.45 | 0.166 | 4.90 | 0.80 | 3.14 | 0.343 | 2.60 | 0.90 |
| OR15_C_bar | 4.41 | 3.47 | 5.60 | 0.255 | 5.40 | 1.40 | 4.82 | 0.345 | 5.70 | 2.00 |
| OR15_D_bar | 4.41 | 3.07 | 6.74 | 0.213 | 5.90 | 1.30 | 4.13 | 0.319 | 5.30 | 1.70 |
| OR15_E_bar | 4.41 | 2.47 | 5.20 | 0.305 | 4.00 | 1.20 | 7.16 | 0.367 | 5.30 | 1.90 |
| OR15_F_bar | 4.41 | 1.57 | 7.18 | 0.286 | 5.60 | 1.60 | 3.80 | 0.357 | 4.70 | 1.70 |
| OR15_G_bar | 4.41 | 1.87 | 4.90 | 0.191 | 3.80 | 0.70 | 4.07 | 0.219 | 4.10 | 0.90 |
| OR15_H_bar | 4.41 | 2.07 | 5.07 | 0.271 | 4.30 | 1.20 | 4.66 | 0.214 | 6.20 | 1.30 |
| OR15_I_bar | 4.41 | 2.77 | 7.41 | 0.303 | 6.30 | 1.90 | 3.92 | 0.362 | 5.30 | 1.90 |

I risultati per le sonde precedenti la barriera, riportati nelle figure seguenti, sono stati confrontati con quelli della modellazione fisica realizzata dal DICA dell'Università di Catania, descritta nel cap. 4. Sembra non esserci concordanza tra i risultati della modellazioni fisica e della numerica. La dispersione dei dati sia per gli esperimenti di Catania che per quelli numerici è grande (valori di K_r compresi tra 0,15 e 0,30), e quindi per entrambi i casi il risultato della modellazione non fornisce altro che il range in cui possono ritrovarsi i valori di riflessione.

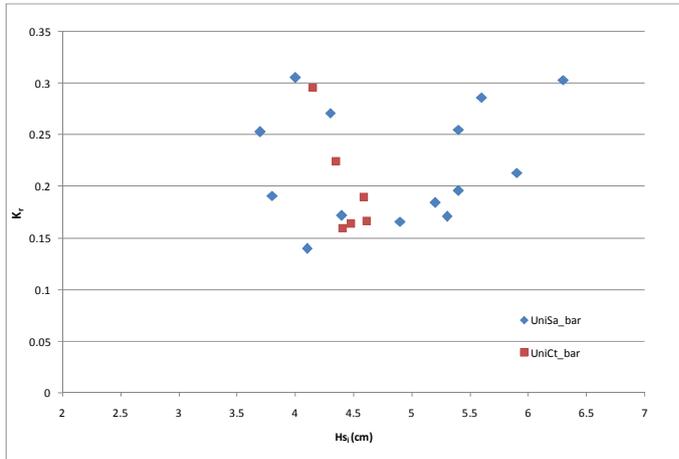


Figura 5.26 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di H_{si}

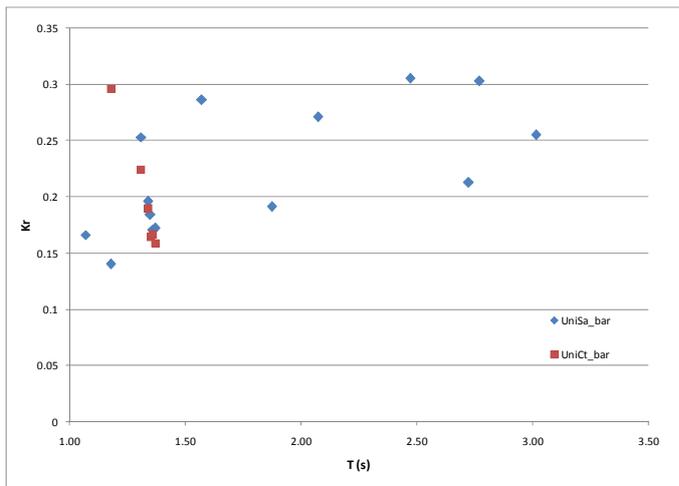


Figura 5.27 Coefficienti di riflessione (K_r) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di T

5.3.3.1 Confronto con formule di letteratura (riflessione)

I coefficienti di riflessione misurati con la modellazione numerica, alle sonde precedenti la barriera, sono stati confrontati con i valori ottenibili da formule di letteratura. Per la descrizione delle relazioni sperimentali usate e della metodologia applicata per il confronto si rimanda al paragrafo 3.5.1.

La barriera nella modellazione numerica è stata trattata come un solido impermeabile, così come tutta la spiaggia su cui è posata. Per questo motivo sono state escluse dal confronto le formule che presentavano variabili riconducibile alle caratteristiche dei massi comunemente adoperati per la costruzione della barriera (porosità, D_{50} , etc.).

Nella tabella e figure seguenti sono sintetizzati i risultati.

Tabella 5.7 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_r simulati e calcolati con formule di letteratura

| | T_1 (s) | kd | H_{si} (cm) | H_{sr} (cm) | R_c/H_{si} | Num. di Iribarren | K_{r1} (simulato) | Seelig (1983) | Postma (1988) | Postma (1989) (dati Van der Meer) | Postma (cor. Zanuttigh- Lamberti 2004) | Postma (cor. Van Der Meer 2005) |
|------------|--------------|------|------------------|------------------|--------------|----------------------|------------------------|------------------|------------------|---|--|--|
| OR11_bar | 1.31 | 0.95 | 3.7 | 0.9 | -2.24 | 5.74 | 0.25 | 0.88 | 0.50 | 0.48 | 0.05 | 0.23 |
| OR13_bar | 1.18 | 1.09 | 4.1 | 0.6 | -2.02 | 4.91 | 0.14 | 0.84 | 0.45 | 0.42 | 0.02 | 0.22 |
| OR14_bar | 1.34 | 0.92 | 5.4 | 1 | -1.54 | 4.86 | 0.2 | 0.84 | 0.44 | 0.41 | 0.03 | 0.26 |
| OR21_bar | 1.36 | 0.91 | 5.3 | 0.9 | -1.57 | 4.98 | 0.17 | 0.85 | 0.45 | 0.42 | 0.04 | 0.27 |
| OR24_bar | 1.35 | 0.92 | 5.2 | 1 | -1.60 | 4.99 | 0.18 | 0.85 | 0.45 | 0.42 | 0.04 | 0.26 |
| OR15_A_bar | 1.37 | 0.90 | 4.4 | 0.8 | -1.89 | 5.51 | 0.17 | 0.87 | 0.49 | 0.46 | 0.05 | 0.25 |
| OR15_B_bar | 1.07 | 1.25 | 4.9 | 0.8 | -1.69 | 4.07 | 0.17 | 0.78 | 0.39 | 0.35 | - | 0.22 |
| OR15_C_bar | 3.01 | 0.32 | 5.4 | 1.4 | -1.54 | 10.94 | 0.26 | 0.96 | 0.80 | 0.87 | 0.40 | 0.48 |
| OR15_D_bar | 2.72 | 0.37 | 5.9 | 1.3 | -1.41 | 9.45 | 0.21 | 0.95 | 0.72 | 0.76 | 0.32 | 0.45 |
| OR15_E_bar | 2.47 | 0.46 | 4 | 1.2 | -2.08 | 10.42 | 0.31 | 0.96 | 0.77 | 0.83 | 0.30 | 0.38 |
| OR15_F_bar | 1.57 | 0.76 | 5.6 | 1.6 | -1.48 | 5.60 | 0.29 | 0.87 | 0.49 | 0.47 | 0.07 | 0.30 |
| OR15_G_bar | 1.87 | 0.62 | 3.8 | 0.7 | -2.18 | 8.10 | 0.19 | 0.94 | 0.64 | 0.66 | 0.17 | 0.30 |
| OR15_H_bar | 2.07 | 0.56 | 4.3 | 1.2 | -1.93 | 8.43 | 0.27 | 0.94 | 0.66 | 0.68 | 0.20 | 0.34 |
| OR15_I_bar | 2.77 | 0.41 | 6.3 | 1.9 | -1.32 | 9.31 | 0.30 | 0.95 | 0.71 | 0.75 | 0.28 | 0.45 |

Dai grafici che seguono, in cui sono riportati i valori di K_r ricavati dall'analisi delle simulazioni rispetto a quelli calcolati con le formule empiriche, si evince come per le relazioni di Seelig 1983, Postma 1988 e Postma 1989 i coefficienti di riflessione sono sostanzialmente sopravvalutati; la correzione alla formula di Postma di Zanuttigh e Lamberti del 2004 migliora di poco il risultato anche se sembra sottostimare la riflessione nella metà dei casi, quelli in cui il periodo dell'onda è inferiori a 1.57s. L'ultima relazione, quella di Postma corretto da Van der Meer 2005 fornisce risultati più vicini a quelli ricavati numericamente.

Tale conclusione si può ricavare anche dal grafico che riporta i valori di RMSE calcolati per le formule utilizzate per il confronto.

Tabella 5.8 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_r

| Seelig (1983) | Postma (1988) | Postma (1989, dati Van der Meer) | Postma (corretto da Zanuttigh-Lamberti 2004) | Postma (corretto da Van Der Meer 2005) |
|---------------|---------------|----------------------------------|--|--|
| 0.67 | 0.37 | 0.30 | 0.13 | 0.11 |

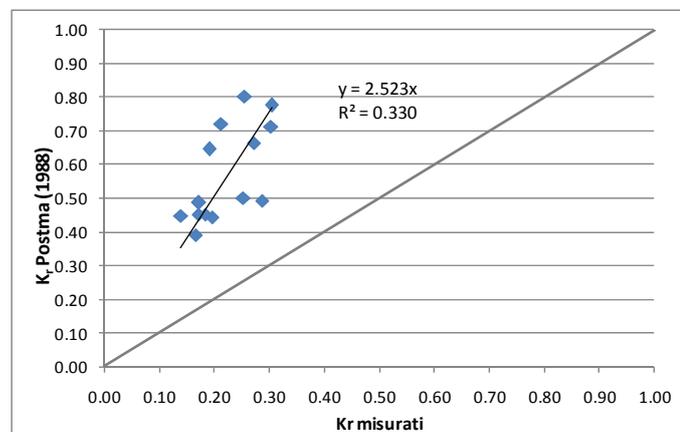


Figura 5.28 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma (1988)

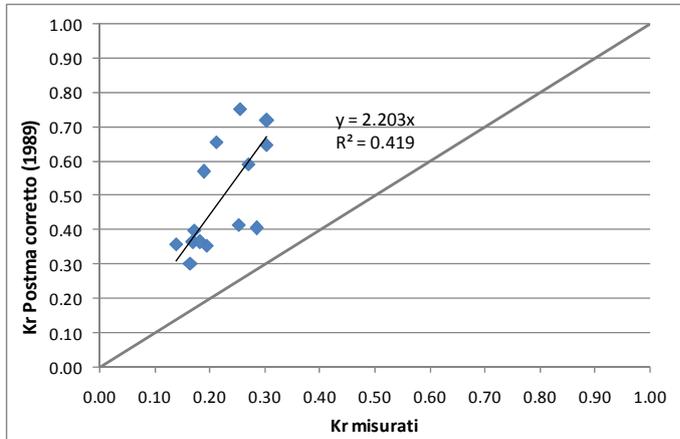


Figura 5.29 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta (1989)

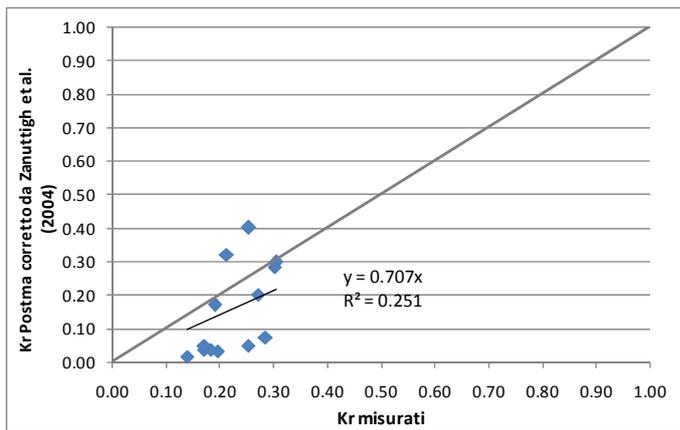


Figura 5.30 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Zanuttigh et al. (2004)

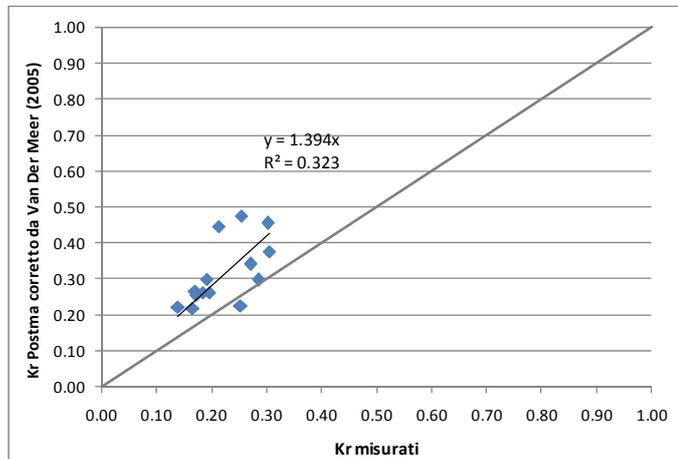


Figura 5.31 Confronto K_r simulati con valori ricavati dalla formula di Postma corretta da Van der Meer (2005)

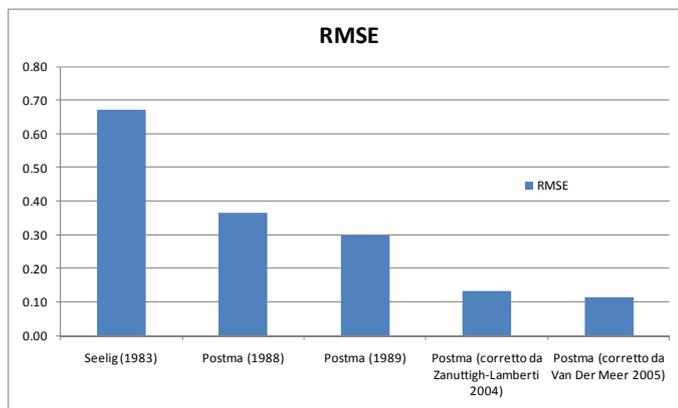


Figura 5.32 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_r

5.3.4 Trasmissione

Come fatto per il caso presentato al capitolo 3, anche per questo studio numerico è stata effettuata l'analisi della trasmissione del modo ondoso a tergo della barriera mediante il calcolo dei coefficienti di trasmissione a partire dagli spettri rilevati nelle ascisse poste prima e dopo la barriera (cfr. paragrafo 3.6) I risultati dei K_t ottenuti sono riportati nelle tabelle seguenti insieme ad alcuni parametri caratteristici utili per effettuare un confronto.

Tabella 5.9 Caratteristiche simulazioni e valori dei K_t simulati

| | T_{in} (s) | T_m (s) | d/L | kd | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | H_{1m0} (cm) | B/L | B/ H_{si} | B/ H_{1m0} | K_t |
|------------|-----------------|--------------|------|------|------------------|------------------|-------------------|------|-------------|--------------|-------------|
| OR11_bar | 1.31 | 1.31 | 0.15 | 0.95 | 3.70 | 2.90 | 4.76 | 0.17 | 8.92 | 6.93 | 0.79 |
| OR13_bar | 1.18 | 1.18 | 0.17 | 1.09 | 4.10 | 3.30 | 5.25 | 0.19 | 8.05 | 6.29 | 0.80 |
| OR14_bar | 1.34 | 1.34 | 0.15 | 0.92 | 5.40 | 3.80 | 6.82 | 0.16 | 6.11 | 4.84 | 0.70 |
| OR21_bar | 1.36 | 1.36 | 0.14 | 0.91 | 5.30 | 3.90 | 6.54 | 0.16 | 6.23 | 5.05 | 0.74 |
| OR24_bar | 1.35 | 1.35 | 0.15 | 0.92 | 5.20 | 3.80 | 6.58 | 0.16 | 6.35 | 5.01 | 0.73 |
| OR15_A_bar | 1.37 | 1.37 | 0.14 | 0.90 | 4.40 | 3.40 | 6.06 | 0.16 | 7.50 | 5.45 | 0.76 |
| OR15_B_bar | 1.07 | 1.07 | 0.20 | 1.25 | 4.90 | 3.30 | 6.45 | 0.22 | 6.73 | 5.12 | 0.67 |
| OR15_C_bar | 3.47 | 3.01 | 0.05 | 0.32 | 5.40 | 2.70 | 5.60 | 0.06 | 6.11 | 5.89 | 0.51 |
| OR15_D_bar | 3.07 | 2.72 | 0.06 | 0.37 | 5.90 | 3.2 | 6.74 | 0.06 | 5.59 | 4.89 | 0.54 |
| OR15_F_bar | 1.57 | 1.57 | 0.12 | 0.76 | 5.60 | 3.80 | 7.18 | 0.13 | 5.89 | 4.60 | 0.67 |
| OR15_G_bar | 1.87 | 1.87 | 0.10 | 0.62 | 3.80 | 2.70 | 4.90 | 0.11 | 8.68 | 6.73 | 0.71 |
| OR15_H_bar | 2.07 | 2.07 | 0.09 | 0.56 | 4.30 | 3.60 | 5.07 | 0.10 | 7.67 | 6.50 | 0.79 |
| OR15_I_bar | 2.77 | 2.77 | 0.06 | 0.41 | 6.30 | 4.30 | 7.41 | 0.07 | 5.24 | 4.45 | 0.69 |

Nei grafici che seguono il K_t calcolato è riportato in funzione del periodo T , del rapporto tra la larghezza in sommità della barriera (B) e la lunghezza d'onda L , dell'altezza d'onda significativa incidente. Dal primo grafico, confronto con il periodo del moto ondoso T , si nota una leggera tendenza dei valori di K_t a diminuire con il crescere del periodo. Anche in questo caso i valori delle sperimentazioni in vasca di Catania sono più bassi a parità di parametri utili per il confronto. Tale comportamento potrebbe essere dovuto alla differenza degli elementi fisici presenti nella sperimentazione fisica e non nella numerica: la simulazione numerica ha

un fondo non scabro ed è tutto impermeabile mentre la prova fisica ha una barriera fatta in massi naturali (in scala), con una propria forte scabrezza che dovrebbe essere la causa di un aumento di dissipazione di energia associata al moto ondoso che passa al di sopra di essa, limitando quindi l'altezza d'onda trasmessa al lato spiaggia.

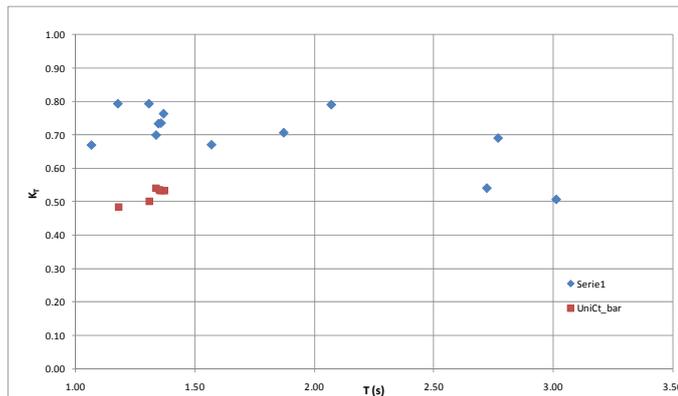


Figura 5.33 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di T

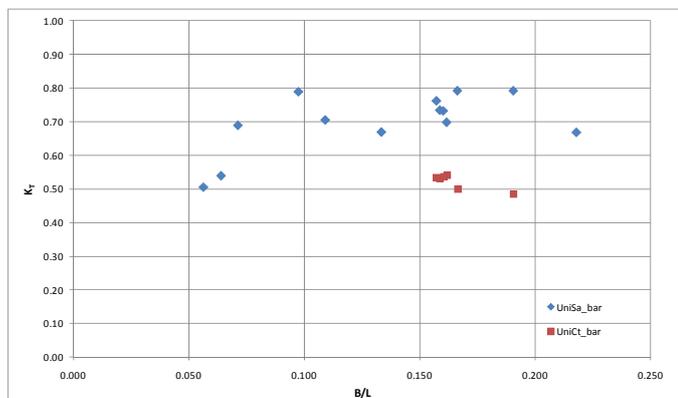


Figura 5.34 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di B/L

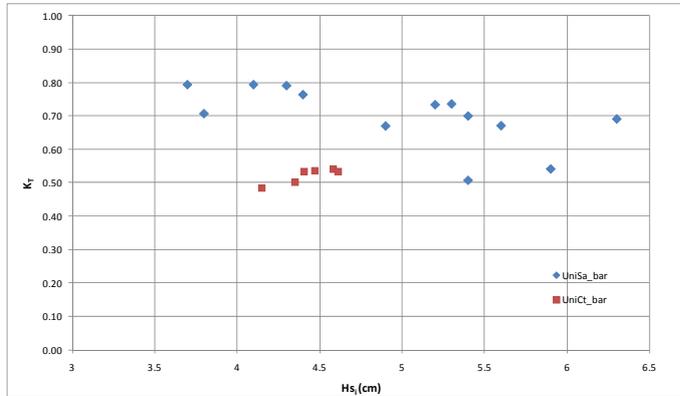


Figura 5.35 Coefficienti di trasmissione (K_t) simulati (Unisa_bar in blu) e misurati in vasca (UniCt_bar in rosso) al variare di H_{si}

5.3.4.1 Confronto con formule di letteratura (trasmissione)

Come per l'analisi della riflessione del moto ondoso anche per la trasmissione è stato effettuato un confronto con le formule di letteratura esistenti e usualmente utilizzate per analisi e progettazione di questo tipo di opere. Le formule utilizzate sono le stesse descritte in precedenza al paragrafo 3.6.1 a meno di quella di Seabrooke e Hall, in quanto qui la barriera è considerata impermeabile.

Tabella 5.10 Caratteristiche delle simulazioni effettuate con valori del K_t simulati e calcolati con formule di letteratura

| | H_{1m0} (cm) | K_t | T_{imed} (s) | kd | H_{si} (cm) | H_{st} (cm) | B/L | B/ H_{si} | B/ H_{1m0} | Num. Iribarren | Rc/ H_{si} | s_p | K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) |
|------------|-------------------|-------------|-------------------|------|------------------|------------------|--------|-------------|--------------|-------------------|--------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| OR11_bar | 4.76 | 0.79 | 1.31 | 0.95 | 3.7 | 2.9 | 0.17 | 8.92 | 6.93 | 5.74 | -2.24 | 0.01 | 0.80 | 0.80 | 0.88 |
| OR13_bar | 5.25 | 0.79 | 1.18 | 1.09 | 4.1 | 3.3 | 0.19 | 8.05 | 6.29 | 0.49 | -2.02 | 0.02 | 0.80 | 0.80 | 0.73 |
| OR14_bar | 6.82 | 0.70 | 1.34 | 0.92 | 5.4 | 3.8 | 0.16 | 6.11 | 4.84 | 0.49 | -1.54 | 0.02 | 0.80 | 0.71 | 0.57 |
| OR21_bar | 6.54 | 0.74 | 1.36 | 0.91 | 5.3 | 3.9 | 0.16 | 6.23 | 5.05 | 0.50 | -1.57 | 0.02 | 0.80 | 0.73 | 0.58 |
| OR24_bar | 6.58 | 0.73 | 1.35 | 0.92 | 5.2 | 3.8 | 0.160i | 6.35 | 5.01 | 0.50 | -1.60 | 0.02 | 0.80 | 0.74 | 0.59 |
| OR15_A_bar | 6.06 | 0.76 | 1.37 | 0.90 | 4.4 | 3.4 | 0.16 | 7.50 | 5.45 | 0.55 | -1.89 | 0.02 | 0.80 | 0.80 | 0.69 |
| OR15_B_bar | 6.45 | 0.67 | 1.07 | 1.25 | 4.9 | 3.3 | 0.22 | 6.73 | 5.12 | 0.41 | -1.69 | 0.03 | 0.8 | 0.76 | 0.62 |
| OR15_C_bar | 5.60 | 0.51 | 3.01 | 0.32 | 5.4 | 2.7 | 0.06 | 6.11 | 5.89 | 1.09 | -1.54 | 0.00 | 0.8 | 0.80 | 0.59 |
| OR15_D_bar | 6.74 | 0.54 | 2.72 | 0.37 | 5.9 | 3.2 | 0.06 | 5.59 | 4.89 | 0.95 | -1.41 | 0.01 | 0.8 | 0.74 | 0.55 |
| OR15_E_bar | 5.20 | - | 2.47 | 0.46 | 4 | 0.0 | 0.08 | 8.25 | 6.34 | 1.04 | -2.08 | 0.00 | 0.8 | 0.80 | 0.77 |
| OR15_F_bar | 7.18 | 0.67 | 1.57 | 0.76 | 5.6 | 3.8 | 0.13 | 5.89 | 4.60 | 0.56 | -1.48 | 0.01 | 0.8 | 0.71 | 0.55 |
| OR15_G_bar | 4.90 | 0.71 | 1.87 | 0.62 | 3.8 | 2.7 | 0.11 | 8.68 | 6.73 | 0.81 | -2.18 | 0.01 | 0.8 | 0.80 | 0.80 |
| OR15_H_bar | 5.07 | 0.79 | 2.07 | 0.56 | 4.3 | 3.4 | 0.10 | 7.67 | 6.50 | 0.84 | -1.93 | 0.01 | 0.8 | 0.80 | 0.72 |
| OR15_I_bar | 7.41 | 0.69 | 2.77 | 0.41 | 6.3 | 4.3 | 0.07 | 5.24 | 4.45 | 0.93 | -1.32 | 0.01 | 0.8 | 0.71 | 0.52 |

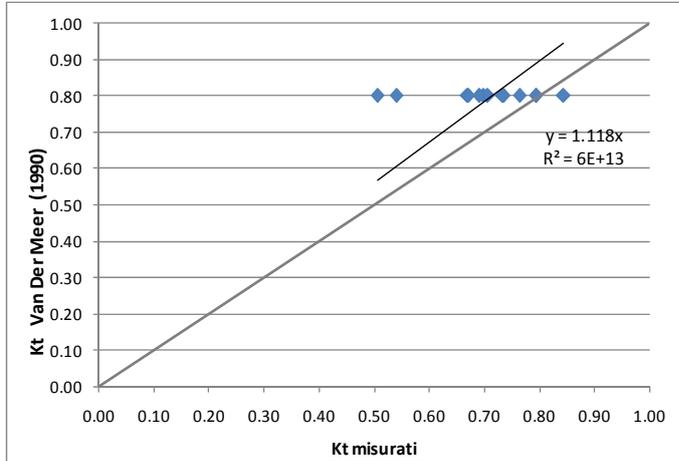


Figura 5.36 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Van Der Meer (1990)

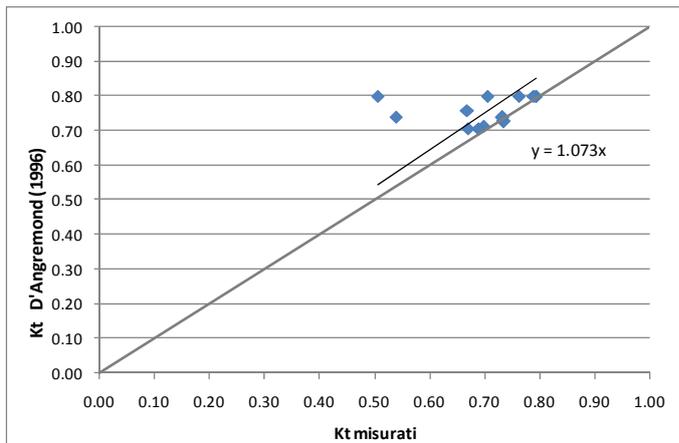


Figura 5.37 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di d'Angremond (1996)

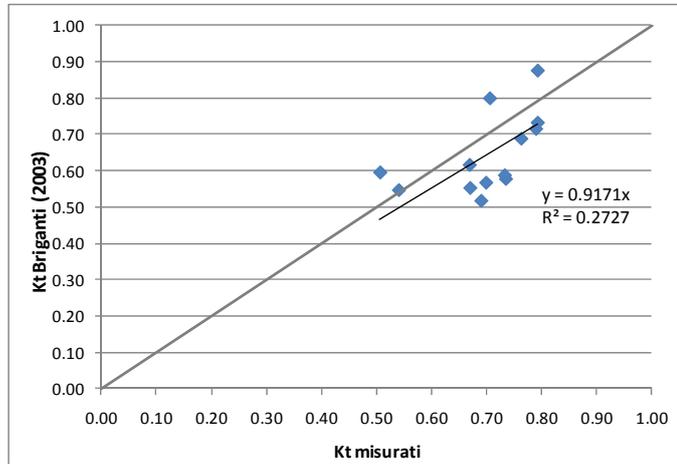


Figura 5.38 Confronto K_t simulati con valori ricavati dalla formula di Briganti (2003)

La formula di Van Der Meer, per le caratteristiche geometriche del caso in studio (rapporto R_c/H_{si}), fornisce sempre il valore limite di 0,8. Riportando i valori misurati in funzione del rapporto R_c/H_{si} sul grafico complessivo del database di prove utilizzare da Van Der Meer si nota come i punti ricadano per la maggior parte nell'intervallo di confidenza imposto dall'autore, a differenza dei risultati della modellazione fisica, abbastanza lontani da esso (cfr. Figura 5.39).

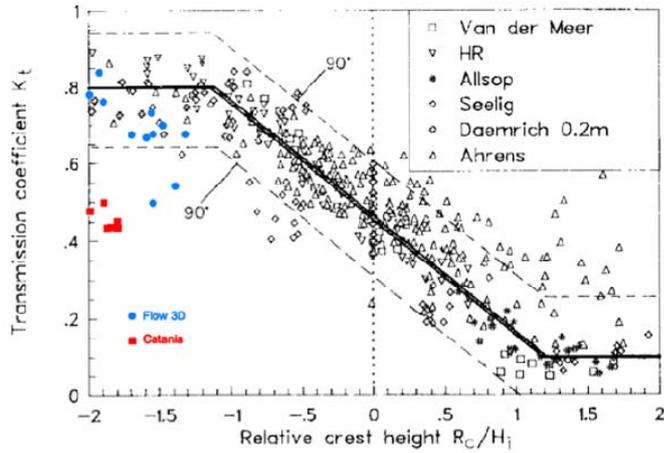


Figura 5.39 Confronto K_t simulati con valori sperimentali alla base della formula di Van Der Meer (1990)

Le relazioni di D'Angremond et al. (1996) e di Briganti et al. (2003) sono quelle che meglio riproducono i risultati ottenuti. A differenza della formula di Van der Meer, molto semplice considerando come parametri solo la sommersenza e l'altezza del moto ondoso (R_c/H_s), le due relazioni tengono in conto altre caratteristiche geometriche della barriera sommersa che svariati test hanno confermato essere importanti nel processo di trasmissione del moto ondoso quali la larghezza del coronamento e la pendenza del paramento lato mare, nonché il periodo del moto ondoso (presente nel parametro di Iribarren).

Anche per la trasmissione è stato valutato l'RMSE, definito nei paragrafi precedenti, riportato nel grafico seguente.

Tabella 5.11 Valori del RMSE per le formule di letteratura utilizzate per il K_t

| K_t Van der Meer (1990) | K_t D'Angremond et al. (1996) | K_t Briganti et al. (2003) |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 0.132 | 0.102 | 0.103 |

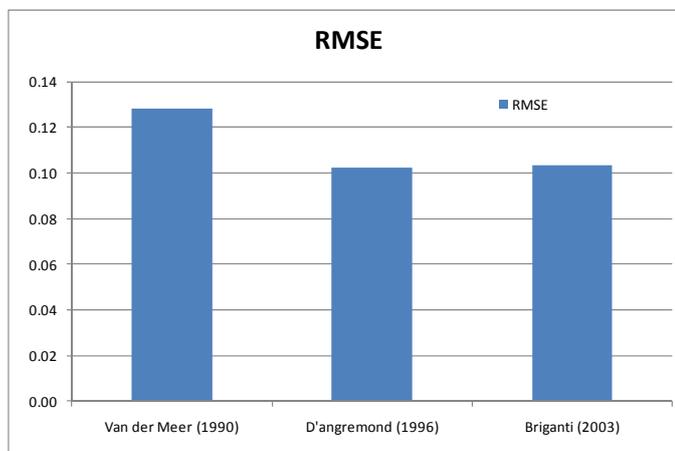


Figura 5.40 Valori del RMSE calcolati dal confronto con formule di letteratura per il K_t

Il grafico seguente è relativo agli esperimenti compiuti da Losada et al. (1997) per la valutazione della riflessione e trasmissione del moto ondoso regolare che investe un ostacolo rettangolare sommerso di diversa porosità, nonché della generazione di superarmoniche a tergo dell'ostacolo. Le caratteristiche geometriche delle prove sono simili a quelle del caso numerico qui presentato per quello che riguarda la profondità al di sopra dell'ostacolo (9cm) e le caratteristiche dei periodi del moto ondoso incidente (tra 0.8s e 2.7s), le altezze invece erano più basse (tra 1.96cm e 4.29cm). La differenza sta nella larghezza dell'ostacolo (coronamento): quello degli esperimenti di Losada è di 80cm contro i 33cm del caso numerico; e nell'assenza di un profilo di spiaggia reale nel caso sperimentale.

Riportando i valori dei coefficienti di trasmissione e riflessione ricavati con le simulazioni numeriche si nota come i primi siano sensibilmente più bassi di quelli misurati da Losada per il caso impermeabile mentre i secondi si ritrovano nel range della sperimentazione fisica. Tale differenza per la trasmissione potrebbe risiedere nella differente larghezza di coronamento (maggiore) del caso analizzato da Losada e dalla presenza della spiaggia nel caso numerico che causerebbe una maggiore disturbo al moto ondoso trasmesso (maggiore dissipazione).

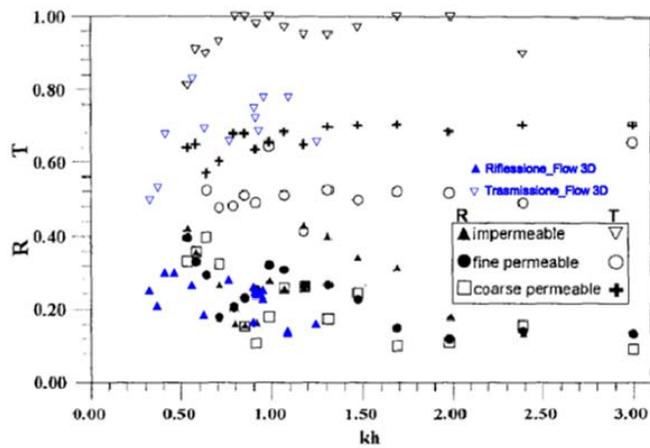


Figura 5.41 Confronto con i risultati sperimentali riportati in Losada et al., 1997

6 CONCLUSIONI

Gli attuali livelli raggiunti dalle tecnologie informatiche permettono di utilizzare correntemente i metodi della Fluidodinamica Computazionale per indagare l'idrodinamica nei problemi concernenti l'idraulica marittima. In particolare lo studio dell'interazione onde strutture è rilevante per molteplici scopi pratici (progettuali) quali la valutazione della capacità di abbattimento dell'energia del moto ondoso incidente la costa, l'efficacia e l'efficienza di interventi di ripascimento, la stabilità di strutture a scogliera sommerse ed emerse, la valutazione del rischio costiero e quanto altro proprio di questa branca dell'ingegneria.

Come mostrato nel presente lavoro di tesi, il codice numerico utilizzato si presta, previa un'opportuna fase di calibrazione e di analisi di sensibilità, a riprodurre i fenomeni caratteristici dell'interazione onde strutture sommerse. Nel confronto con le formule per il calcolo di alcuni parametri sintetici, è vero che c'è una grande dispersione nei dati simulati, ma questa dispersione è presente anche nei risultati sperimentali di cui le formule empiriche rappresentano le sintesi (basta pensare al diagramma di Van der Meer). Questa dispersione è nei fatti e deriva dai moltissimi parametri che influenzano i risultati.

La calibrazione effettuata su dati da indagini sperimentali condotte nell'ambito del progetto DELOS e riportate in Vidal et al. (2001) ha dato buoni risultati, così come riscontrato anche da Garcia et al. (2004) che hanno fatto lo stesso utilizzando un diverso codice numerico basato sulle stesse equazioni e assunti di base di quello usato nel presente lavoro.

Le analisi spettrali effettuate sui risultati numerici, sia sulla base del lavoro sperimentale condotto insieme all'unità di ricerca del DICA dell'università di Catania che su quello di Vidal et al., hanno riprodotto il fenomeno della dislocazione dell'energia ad armoniche di frequenza multipla della fondamentale nel caso di interazione onda-struttura, come ipotizzato teoricamente da Massel (1986) e Goda et al. (1999) e confermato da studi sperimentali anche in presenza di frangimento

(Brossard e Chagdali, 2001; Calabrese et al., 2008; Ciardulli, 2009; Buccino et al. 2009).

Per scopi prettamente progettuali è importante valutare alcuni parametri caratterizzanti la risposta idraulica di una barriera sommersa quali il coefficiente di riflessione, di trasmissione ed il setup.

Di notevole importanza progettuale è la valutazione dei coefficienti di trasmissione, essendo lo scopo principale di una barriera sommersa quello di limitare l'energia incidente la costa. Una conseguenza però della sua stessa presenza è l'insorgere di setup a tergo di essa (lato spiaggia), a volte di entità non trascurabile specie per barriere continue molto lunghe. Questo può comportare l'instaurarsi di correnti che potrebbero trasportare i sedimenti fuori dalla zona protetta dalla stessa barriera nonché problematiche di stabilità strutturale. (Zanuttigh e Lamberti, 2010; Ruol et al, 2003; Johnson et al., 2005)

La riflessione solitamente è di maggiore interesse per lo studio di strutture emerse quali possono essere, ad esempio, le barriere a protezione di porti; questo perché l'esistenza di onde riflesse può ripercuotersi sulla sicurezza della navigazione. Tale questione è poco rilevante per le strutture sommerse che solitamente sono poste su bassi fondali. (Zanuttigh e Van Der Meer, 2008)

I risultati riguardanti la riflessione ricavati dalle simulazioni numeriche basate sugli esperimenti di Catania sono stati comunque soddisfacenti, avendo ottenuto valori dello stesso ordine di grandezza di quelli misurati in vasca (cfr. Paragrafo 5.3.3). Sono da tenere in conto le differenti condizioni di modellazione tra le prove sperimentali e quelle numeriche, ad esempio il fondo mobile in vasca non riprodotto numericamente, il diverso modo di generazione del moto ondoso, nonché il fatto che la barriera testata presenta un valore di profondità di imbasamento (e quindi di sommergenza) fuori dal range solitamente usato per questo tipo di strutture; di fatto è una protezione profonda di un intervento di ripascimento, non nasce direttamente con il fine di abbattere l'energia del moto ondoso incidente.

I valori dei K_r simulati in questo caso hanno mostrato, a valle del confronto con alcune formule di letteratura note e solitamente usate, come il modello numerico utilizzato sia abbastanza accurato nel predire questo tipo di aspetto (ad esempio Figura 5.31).

La riflessione è stata valutata anche per le simulazioni basate sugli esperimenti di Vidal et al., qui variando il parametro di progetto B (larghezza in sommità della barriera), e i risultati sono allo stesso modo incoraggianti come per il caso precedente (cfr. paragrafo 3.5). In particolare si è notato come la riflessione diminuisca per valori di B (larghezza cresta) maggiori mentre aumenti all'aumentare del periodo dell'onda fino ad un certo valore da cui il trend sembra invertirsi. Anche per questo caso i confronti con risultati attesi da formule di letteratura sono coerenti (ad esempio cfr. Figura 3.23).

La trasmissione è stata valutata sia per il caso di Catania (cfr. paragrafo 5.3.4) che per quello di Vidal et al. (cfr. paragrafo 3.6) mostrando chiaramente, come noto in letteratura, l'influenza del parametro B e del periodo dell'onda. All'aumentare di B diminuisce il coefficiente K_t (ovvero diminuisce l'energia trasmessa) mentre questi aumenta ad aumentare del periodo dell'onda. In questa analisi, meglio di quella sulla riflessione, si ha la conferma dell'accuratezza del modello numerico nel predire valori di K_t coerenti con le formule di letteratura utilizzate nella pratica progettuale (e quindi sostanzialmente con i dataset sperimentali su cui esse sono tarate) (Calabrese et al., 2005). E' da considerare l'incertezza delle formule esistenti che tengono conto solitamente di pochi parametri geometrici mentre sono tarate su dataset in cui questi variano in maniera estremamente random. Ciò genera la necessità di usare con cautela tali formule aprendo la possibilità di effettuare studi numerici specifici a supporto della progettazione; questi infatti riescono a considerare ormai tutti gli aspetti idrodinamici che entrano in gioco nei problemi di interazione onda-struttura.

Il setup, come prima accennato, è un parametro che è opportuno valutare in sede progettuale per indagare le condizioni che si instaurano a tergo della barriera. L'analisi condotta per i casi con a base le sperimentazioni di Vidal et al. ha permesso di ricavare indicazioni sul comportamento della barriera soffolta, nonché sull'applicabilità di alcuni metodi di calcolo del setup presenti in letteratura.

In primo luogo, la calibrazione effettuata sui dati sperimentali di Vidal et al. per il test case utilizzato ha dato esiti incoraggianti (cfr. paragrafo 3.7). La fase seguente è stata la verifica dell'efficacia del sistema di ricircolo posto a tergo della barriera che permette di condurre l'esperimento numerico in maniera da rappresentare il caso reale di barriere molto estese in direzione parallela alla costa (senza il ricircolo attivato) che per

barriere brevi ed interrotte (ricircolo attivato). Si è verificato quindi che anche numericamente è possibile, in maniera agevole, ricreare il sistema di ricircolo per simulare la condizione fisica reale in sito (cfr. Figura 3.38).

L'analisi è proseguita con l'indagare l'applicabilità di alcune formule di letteratura basate su indagini sperimentali. In primo luogo è stata applicata la formula di Loveless (1998), lineare rispetto al parametro B . Nei casi simulati di B pari a 25cm e 100cm si nota come i risultati numerici siano molto lontani da quelli previsti dalla formula per il caso $B100$ mentre si collocano meglio per il caso di barriera a cresta più stretta ($B25$).

E' stato implementato anche il metodo proposto da Calabrese et al. (2008) che determina il setup come somma di due contributi: quello dovuto al trasporto di massa sopra la barriera e quello del flusso di quantità di moto. In questo caso i risultati numerici hanno una coerenza maggiore per entrambi i casi indagati ($B=25\text{cm}$ e $B=100\text{cm}$). Questo metodo di calcolo, derivato da indagini sperimentali, presuppone la determinazione dei coefficienti di riflessione e trasmissione. Per questo motivo poco si presta ad essere usato in fase progettuale senza un supporto di modellazione fisica o numerica. In questo caso, il vantaggio di poter condurre simulazioni numeriche con risultati ottenibili in tempi relativamente brevi darebbe un congruo supporto all'indagine di questo particolare aspetto.

In definitiva l'utilizzo di modelli numerici basati sulle equazioni RANS e sul metodo VOF per il tracciamento della superficie libera, considerato il crescente sviluppo dei calcolatori elettronici e dei metodi di calcolo, si configura come un importante strumento a supporto della progettazione nel caso di strutture in acque basse.

Resta la naturale necessità di far fruttare la propria esperienza nel verificare l'accuratezza dei risultati ottenuti rispetto alle ipotesi e semplificazioni introdotte dai metodi numerici utilizzati, nonché l'adeguatezza del modello numerico ricreato rispetto al problema progettuale da affrontare.

BIBLIOGRAFIA

- Baldock, T. E., Simmonds, D.J., (1999). Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry. *Coastal Engineering*, vol.38, n.3: 167-176.
- Batchelor, G.K., (1983). An Introduction to Fluid Mechanics. *Cambridge University Press*.
- Benassai, E., (2006). Le dighe marittime: progettazione, realizzazione, dissesti, manutenzione. *Istituto italiano per gli studi filosofici*.
- Boccotti, P., (2000). Wave mechanics for ocean engineering. *Elsevier Oceanography series*, 64.
- Bradford, S.F., (2000). Numerical simulation of surf zone dynamics. *Journal of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering*, Vol. 126, N. 1, Jan./Feb.
- Brossard, J., Hémon, A., Rivoalen, E., (2000). Improved analysis of regular gravity waves and coefficient of reflection using one or two moving probes. *Coastal Engineering*, 39: 193-212.
- Brossard, J. and Chagdali, M., (2001). Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. *Coastal Engineering* 42: 277-290.
- Buccino M., Calabrese M., Ciardulli F., Pasanisi F., (2008). 2ND Order Wave Transmission Past A Submerged Breakwater. *Proc. International Conference on Coastal Engineering, Hamburg*.
- Calabrese M., Buccino M., Zanuttigh B., Cappiotti L., Paris A., (2005). Riflessione e trasmissione di scogliere a cresta bassa. *Studi Costieri* 9: 75-95.
- Calabrese M., Buccino M., Ciardulli F., Di Pace P., Benassai E., (2008). The generation of periodic shallow water waves in a flume: results from small and large scale tests. *CoastLab, Bari (Italy)*.
- Calabrese M., Vicinanza D., Buccino M., (2008). 2D Wave setup behind submerged breakwaters. *Ocean Engineering* 35: 1015-1028.
- Chopakatla S.C., Lippmann, T.C., Richardson, J.E., (2008). Field verification of a computational fluid dynamics model for wave transformation and breaking in the surf zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 134, n. 2.
- Ciardulli, F., (2009). La Risposta Idraulica di Barriere Sommerse in Campo Non Lineare. *Ph.D. thesis, Polo delle Scienze e delle Tecnologie - Facoltà di Ingegneria - Università Degli Studi Di Napoli "Federico II"*.

- Ciardulli F., Buccino M., Calabrese M., (2009). Submerged Breakwater as a Non Linear Device: Experimental Investigation. *4rd International Short Conference On Applied Coastal Research, 15-17 June 2009, Barcelona (Spain)*.
- Daemen, I.F.R., (1991). Wave transmission at low-crested structure. *Delft Hydraulic Rep. H462, Msc Thesis, Delft Univ. of Technology, Delft, Netherlands*.
- Dalrymple, R.A, Rogers, B.D., (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering, 53: 141–147*.
- d’Angremond, K., van der Meer, J.W., De Jong, R.J., (1997). Wave transmission at low-crested structures. *Proc. of International Conference of Coastal Engineering, ASCE, 2418-2426*;
- Dentale, F., Monaco, M., Pugliese Carratelli, E., (2008). A numerical assessment of scale effects on wave breaking modeling, *3rd SCACR International Short Course and Workshop on Applied Coastal Research, Lecce, 177-188*.
- Dentale, F., Pugliese Carratelli, E., Pane, S., (2009). Modellazione numerica del moto ondoso su barriere frangiflutti sommerse porose, *Studi Costieri 16: 89-106*.
- Dentale, F., Russo, S.D., Pugliese Carratelli, E., Messina B., Mascetti S., (2009). Studio numerico avanzato sul moto di filtrazione in ambito marittimo. *Analisi & Calcolo, Giugno 2009, pp. 42-45*.
- Dentale, F., Russo, S.D., Pugliese Carratelli, E., (2010a). Innovative numerical simulation to study the fluid motion within rubble mound breakwaters and the armour stability, *17th Armourstone user meeting, Wallingford, UK, articolo selezionato per l’Award for Innovation 2010*.
- Dentale, F., Russo, S. D., Pugliese Carratelli, E., Mascetti, S. (2010b). Analisi numerica sull’idrodinamica di una barriera frangiflutti emersa porosa e la stabilità della mantellata. *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, 14-17 settembre 2010*.
- Detle, H.H., Larson, M., Murphy, J., Newe, J., Peters, K., Reniers, A., Steetzel, H., (2002). Application of prototype flume tests for beach nourishment assessment. *Coastal Engineering 47: 137–177*.
- Diskin, M.H. et al., (1970). Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters”. *J. Waterways and Harbours Division, ASCE*.
- Faraci, C. Foti, E., Baglio, S., (2000). Measurement of sandy bed scour process in an oscillating flow by using structured light. *Measurement, 28(3), 159-174*.
- Flow Science Inc. (2009). FLOW-3D® Theory Manual. *Santa Fe, New Mexico, USA*.
- Foti, E. Note di idraulica marittima e ingegneria costiera. *Università degli Studi di Catania – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale*.
- Foti, E., Scandura, P., (2004). A low Reynolds number k–e model validated for oscillatory flows over smooth and rough wall. *Coastal Engineering 51: 173-184*.

- Frigaard, P., Brorsen, M., (1993). A time domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coastal Engineering*, 24: 205-215.
- Garcia, N., J. L. Lara, Losada, I. J., (2004). 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested breakwaters. *Coastal Engineering* 51: 991-1020.
- Giarrusso C.C., Dentale F., Pugliese Carratelli E., (2003). On the Stability of Protected Beaches, *6th International Conference on Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions*, *Coastal engineering*.
- Gimenez-Curto, L.A., (1979). Behaviour of rubble mound breakwaters under wave action. *Ph.D. thesis, University of Santander, Santander*.
- Goda, Y., Suzuki, Y., (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *ASCE, Proc. of 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii*, 1: 828-845.
- Hieu, P.D., Tanimoto, K., (2006). Verification of a VOF-based two phase flow model for wave breaking and wave–structure interactions. *Ocean Engineering, Vol.33 Issue: 11-12: 1565-1588*.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comp. Physics* 39: 201-225.
- Hirt, C. W., and Sicilian, J. M., (1985). A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. *Proc., 4th Int. Conf. on Ship Hydrodynamics, National Academy of Science, Washington, D.C.*
- Huang, C.J., Chang, H.H., Hwung, H.H., (2003). Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a submerged breakwater. *Coastal Engineering* 49: 1-24.
- Hsu T.J., Sakakiyama, T., Liu P.L.F., (2002). A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. *Coastal Engineering* 46: 25-50.
- Hughes, S. A., (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. *World Scientific, Singapore*.
- Hur, D.S., Mizutani, N., (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. *Coastal Engineering* 47: 329-345.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, D., Caceres, I., (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering* 52: 949-969
- Kajima, R., (1969). Estimation of incident wave spectrum in the sea area influenced by reflection. *Coastal Engineering in Japan, vol. 12: 9-16*.
- Karim, M.F., Tanimoto, K., Hieu, P.D., (2003). Simulation of Wave Transformation in Vertical Permeable Structure. *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003*.

- Karim M.F., Tanimoto K., Hieu P.D., (2009). Modelling and simulation of wave transformation in porous structures using VOF based two-phase flow model. *Applied Mathematical Modelling* 33: 343-360.
- Lara, J. L., Garcia, N., Losada, I. J., (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering* 53: 395- 417.
- Lara J.L., Losada I.J., Guanche R., (2008). Wave interaction with low-mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering* 35: 1388-1400.
- Le Méhauté, B., (1976). Similitude in Coastal Engineering. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division. American Society of Civil Engineering, Vol. 102, N. WW3, pp. 317-335.*
- Lin, P., (2008). Numerical Modelling of Water Waves: An Introduction to Engineers and Scientists. *Taylor & Francis publisher.*
- Lin, P., Karunarathna, S.A.S., (2007). Numerical Study of Solitary Wave Interaction with Porous Breakwaters. *Journal Of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering, ASCE - sept/oct 2007.*
- Lin, P., Liu, P.L.F., (1998a). Turbulence transport, vorticity dynamics, and solute mixing under plunging waves in surf zones. *J. Geophys. Res., 103(15), pp. 677-694.*
- Lin, P., Liu, P.L.F., (1998b). A numerical study of breaking waves in the surf zone. *J. Fluid Mech., vol. 359, pp. 239-264.*
- Lin, P., Liu, P. L.F., (1999). Internal Wave-Maker For Navier-Stokes Equations Models. *Journal Of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering, July/August.*
- Liu, P.L.F., Lin, P., Chang, K.A., Sakakiyama, T., (1999). Numerical modeling of wave interaction with porous structures. *Journal Of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering, November/December.*
- Longo, S., Petti, M., Losada; I.J., (2002). Turbulence in the swash and surf zones: a review. *Coastal Engineering* 45: 129-147.
- Losada, I.J., Losada, M.A., Martin, F.L., (1995). Experimental study of wave-induced flow in a porous structure. *Coastal Engineering* 26: 77-98.
- Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada M.A., (1997). Harmonic Generation Past a Submerged Porous Step. *Coastal Engineering* 31: 281-304.
- Losada, I. J., Lara, J. L., Christensen, E. D., Garcia N., (2005). Modelling of velocity and turbulence fields around and within lowcrested rubblemound breakwaters. *Coastal Engineering* 52: 887-913.
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanche, R., Gonzalez-Ondina, J.M., (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* 55: 47-62.
- Loveless, J.H., Debski, D., MacLeod, A.B., 1998. Sea level set-up behind detached breakwaters. *Coastal Engineering, pp 1665-1678.*

- Mansard, E.P., Funke, E.R., (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. of the 17th Coastal Engineering Conference. ASCE, New York, pp. 154-172.*
- Monaco, M., (2010). Wave action on shallow water and applications to coastal hazard, *Tesi di dottorato in Ingegneria Civile per l'Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Salerno.*
- Nallayarasu, S., Cheong, H. F., Shankar, N. J., (1995). Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments. *Ocean Engineering, vol. 22: 77-86.*
- Ruol, P., Faedo, A., Paris, A., (2003). Prove sperimentali sul comportamento di una scogliera a cresta bassa e sul fenomeno del piling-up a tergo di essa. *Studi Costieri 7: 41-59.*
- Russo, S.D., (2008). Simulazione numerica del frangimento del moto ondoso. *Tesi di Laurea Specialistica, Università degli Studi di Salerno, A.A. 2007/2008.*
- Seabrook, S.R. and Hall, K.R., (1999). Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering, pp 2000-1013.*
- Seelig, W.N.; Ahrens, J.P., (1981). Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters. *CERC, Technical Paper, No. 81/1, pp. 41, Fort Belvoir.*
- Shin, S., Cox, D.T., Kim, I.C., Yim, S., (2006). Wave transformation, impact, and overtopping on a rubble mound breakwater: large scale measurements and numerical modeling. *30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego.*
- Suh, K.D., Park, W.S., Park, B.S., (2001). Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Engineering 43: 149-159.*
- Ting, F.C.K., Kirby, J. T., (1995). Dynamics of surf-zone turbulence in a strong plunging breaker. *Coastal Engineering 24: 177-204.*
- Ting, F.C.K., Kirby, J.T., (1996). Dynamics of surf-zone turbulence in a spilling breaker. *Coastal Engineering 27: 131-160.*
- Ting C.L., Lin M.C., Cheng C.Y., (2004). Porosity effects on non-breaking surface waves over permeable submerged breakwaters. *Coastal Engineering 50: 213-224.*
- Tirindelli, M., Lamberti, A., Paphitis, D., Vidal, C., Hawkins, S., Morchella, P., Sanchez-Arcilla, A., (2000). Wave action on rubble mound breakwaters: the problem of scale effect. *DELOS EVK3-CT-2000-00041.*
- U.S. Army Corps of Engineers, (2002). *Coastal Engineering Manual, Engineer Manual, Washington, D.C. (in 6 volumes).*
- van Gent, M.R.A., (1995). Porous flow through rubble-mound material. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering May/June1995, 176-181.*
- Viccione G., Dentale F., Bovolin V., Pugliese Carratelli E. (2008). Simulation of

- Wave Impact Pressure on Vertical Structures with the SPH Method. *3rd ERCOFTAC SPHERIC workshop on SPH applications, June 2008, Lausanne, Switzerland*, pp 237-240.
- Zelt, J.A., Skjelbreia, J.E., (1992). Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. *Proc. 23th International Coastal Eng. Conf. 1992*.
- Zanuttigh, B., Lamberti, A., (2006). Experimental Analysis and Numerical Simulations of Waves and Current Flows Around Low-Crested Rubble-Mound Structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineer* 132: 10-27.
- Zanuttigh B., Van der Meer J.W., (2006). Wave reflection from coastal structures. *Proc. ICCE 2006, San Diego, vol. 5, 4337-4349*.
- Zanuttigh, B., van der Meer, J.W., (2008). Wave reflection from coastal structures in design conditions. *Coastal Engineering* 55: 771-779.

ALLEGATO A

Metodo di Goda e Suzuki (1976)

Quando si effettuano esperimenti con strutture soggette a moto ondoso all'interno di canali (sia in laboratorio che numericamente) è inevitabile, seppur con tutti gli accorgimenti che è possibile mettere in atto per limitare il fenomeno, che le onde che si propagano sono il risultato di una sovrapposizione dell'onda incidente generata al generatore e della somma di quelle generate per riflessione dalla struttura, dalla spiaggia e dal battitore stesso.

Nasce quindi la necessità di separare la componente del moto ondoso incidente da quella riflessa al fine di conoscere al meglio i fenomeni che si vogliono investigare.

In letteratura esistono diversi metodi che permettono, a partire dalla registrazione dei segnali di sopraelevazione del pelo libero, di effettuare questa separazione operando ora nel dominio delle frequenze o del tempo (Goda and Suzuki (1976), Mansard and Funke (1980), Selt and Skjelbreia (1992), Frigaard and Brorsen (1993)).

Il metodo più adoperato in letteratura usato anche per l'analisi in questo lavoro è quello di Goda e Suzuki, operante nel dominio delle frequenze, che assume il segnale registrato come somma di onde regolari che si muovono con differente ampiezza, frequenza e fase e necessita della misura del segnale in due posizioni diverse. Inoltre, ogni singola componente viene riflessa e si muove in direzione opposta a quella incidente della stessa frequenza.

Quindi si considera

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n \cos(k_n x - \omega_n t + \varphi_n)$$

con

- $\eta(x, t)$ elevazione del pelo libero rispetto al livello medio;
- x posizione della sonda che registra il segnale;
- t tempo;
- a_n ampiezza della n-esima componente;
- k_n numero d'onda della n-esima componente;
- ω_n frequenza della n-esima componente;
- φ_n fase della n-esima componente.

Considerando la riflessione è possibile espandere la sommatoria considerando le componenti incidenti (I) e riflesse (R):

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_{I,n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varphi_{I,n}) + \sum_{n=1}^N a_{R,n} \cos(k_n x + \omega_n t + \varphi_{R,n})$$

Se si considera una sola frequenza, perché il metodo prevede di eseguire le operazioni di seguito descritte per ogni singola componente, si ottiene:

$$\eta(x, t) = a_I \cos(kx - \omega t + \varphi_I) + a_R \cos(kx + \omega t + \varphi_R)$$

Misurando i segnali in due posizioni distanti $x_{1,2}$ nella direzione di propagazione del moto ondoso, come si vede nella figura, si può scrivere:

$$\begin{aligned} \eta_1(x_1, t) &= a_I \cos(kx_1 - \omega t + \varphi_I) + a_R \cos(kx_1 + \omega t + \varphi_R) \\ \eta_2(x_2, t) &= a_I \cos(kx_2 - \omega t + \varphi_I) + a_R \cos(kx_2 + \omega t + \varphi_R) \end{aligned}$$

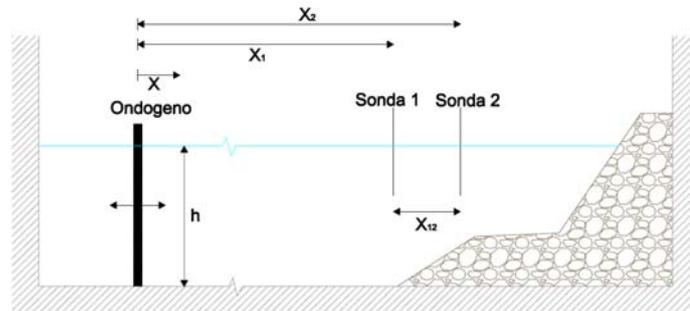


Figura B.1 Schema per l'applicazione del metodo di Goda e Suzuki (1976)

Usando le relazioni trigonometriche si possono scomporre le espressioni precedenti in:

$$\eta_1(x_1, t) = a_I [\sin(kx_1 + \varphi_I) \sin(\omega t) + \cos(kx_1 + \varphi_I) \cos(\omega t)] + a_R [\cos(kx_1 + \varphi_R) \cos(\omega t) - \sin(kx_1 + \varphi_R) \sin(\omega t)]$$

$$\eta_2(x_2, t) = a_I [\sin(kx_2 + \varphi_I) \sin(\omega t) + \cos(kx_2 + \varphi_I) \cos(\omega t)] + a_R [\cos(kx_2 + \varphi_R) \cos(\omega t) - \sin(kx_2 + \varphi_R) \sin(\omega t)]$$

Che si possono riscrivere come:

$$\begin{aligned}\eta_1(x_1, t) &= A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) \\ \eta_2(x_2, t) &= A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Dove:

$$\begin{aligned}A_1 &= a_I \cos(kx_1 + \varphi_I) + a_R \cos(kx_1 + \varphi_R) \\ B_1 &= a_I \sin(kx_1 + \varphi_I) + a_R \sin(kx_1 + \varphi_R) \\ A_2 &= a_I \cos(kx_2 + \varphi_I) + a_R \cos(kx_2 + \varphi_R) \\ B_2 &= a_I \cos(kx_2 + \varphi_I) + a_R \cos(kx_2 + \varphi_R)\end{aligned}$$

L'elevazione η_1 , così come η_2 , sono combinazioni di segnali sinusoidali e cosinusoidali aventi differenti ampiezze costanti però nel tempo. I coefficienti A_1, B_1, A_2 e B_2 , possono essere calcolati da un'analisi di Fourier del segnale registrato per ogni componente dello spettro. È possibile quindi ricavare i valori delle a_I e a_R analiticamente in quanto si dispone di 4 equazioni in 4 incognite (a_I e a_R, φ_I e φ_R):

$$a_I = \frac{1}{2|\sin(kx_{1,2})|} \sqrt{[A_2 - A_1 \cos(kx_{1,2}) - B_1 \sin(kx_{1,2})]^2 + [B_2 + A_1 \sin(kx_{1,2}) - B_1 \cos(kx_{1,2})]^2}$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin(kx_{1,2})|} \sqrt{[A_2 - A_1 \cos(kx_{1,2}) + B_1 \sin(kx_{1,2})]^2 + [B_2 - A_1 \sin(kx_{1,2}) - B_1 \cos(kx_{1,2})]^2}$$

Un'ipotesi alla base dell'analisi di Goda e Suzuki è che la relazione di dispersione (relazione tra il numero d'onda k e la frequenza ω) sia soddisfatta all'interno dell'intervallo di analisi.

Le ampiezze a_I e a_R , stimate per ogni componente di Fourier,

rappresentano l'ampiezza quadratica media $|A_k^2 + B_k^2|^{1/2}$ per il profilo d'onda. Una volta nota l'ampiezza delle singole componenti, gli spettri delle onde incidenti e riflesse possono essere stimati separatamente.

Il metodo può presentare delle singolarità quando $\sin(kx_{1,2})$ assume valore nullo, ovvero quando $\frac{x_{1,2}}{L} = \frac{n}{2}$, con $n = 0, 1, 2, \dots$, quindi le stime spettrali sono valide solo all'interno di un range di frequenze che può essere stimato considerando un limite superiore con frequenza circa uguale a 0.45 e uno inferiore con frequenza 0.05. In pratica significa, al fine di ottenere una stima consistente, che la distanza tra le due sonde di misura deve essere tale che la maggior parte di energia associata al moto sia contenuta all'interno del predetto range di frequenze.

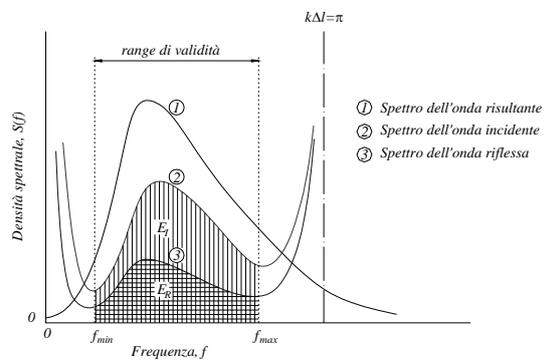


Figura B.2 Goda e Suzuki, 1976 da "Note di idraulica marittima e ingegneria costiera" del prof. E. Foti, Univ. di Catania.